

Modelação versus Medição do Estado Hídrico do Solo

Estudo numa Cultura de Milho no Vale do Sorraia

Nuno Fernando Oliveira Barrocas Vicente

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Agronómica

Orientadora: Maria Isabel Freire Ribeiro Ferreira

Júri:

Presidente: Doutora Maria do Rosário da Conceição Cameira, Professora Associada do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Vogais: Doutora Maria Isabel Freire Ribeiro Ferreira, Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa;

Doutora Maria Teresa Gomes Afonso do Paço, Professora Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

RESUMO

A cultura do milho é hoje a cultura arvense de maior expressão em Portugal, tanto para a produção de silagem como de grão. No entanto, esta área tem vindo a diminuir e em 2016 era apenas de cerca de 120 mil hectares de área cultivada. A escassez de água, um problema que se tem vindo a agravar, torna importante tirar um melhor partido da rega, otimizando a quantidade de água utilizada. Nesse sentido, é necessário dar mais atenção aos parâmetros da rega para saber com precisão adequada quando regar e qual a quantidade de água a utilizar.

O objetivo deste trabalho foi estimar o teor de água no solo para a cultura do milho, com base num modelo simples do balanço hídrico, em que se determina a variação de armazenamento de água, comparando-o com as medições de teor de água do solo recorrendo ao método gravimétrico, para dessa forma ajuizar da adequação dos coeficientes usados na estimativa da evapotranspiração real, um dado de entrada no modelo. Essas medições foram realizadas na Estação Experimental António Teixeira no Vale do Sorraia, numa área regada por pivot. Também nesta Estação, estavam instaladas 4 sondas capacitivas, de empresas diferentes, que registavam o teor de água no solo e apresentavam a sua evolução sazonal, que foi possível analisar qualitativamente. O cálculo da evapotranspiração cultural foi feito com base na evapotranspiração de referência, obtida através da estação meteorológica do IPMA existente na estação experimental, e no coeficiente cultural, que se ajustou para o estudo em questão. Observou-se que a cultura não esteve em stress hídrico. Da comparação dos resultados pode-se concluir que existe um bom ajuste entre o estado hídrico do solo observado e o estimado pelo modelo.

Palavras chave: Milho, evapotranspiração, balanço hídrico, sondas capacitivas, método gravimétrico

ABSTRACT

Nowadays, maize is the most grain crop in Portugal. However, this area has decreased and in 2016 was only about 120 thousand hectares. Water scarcity, which has aggravated, makes it important to take better advantage of irrigation, optimizing the amount of water used. Therefore, is necessary to know irrigation parameters to be able to know, with precision when to irrigate and how much water to use.

The main purpose of this study is to estimate the soil water content for maize by the method of the soil water balance, in which soil water variation is determined, and compare these values through measurements of soil water content using the gravimetric method, to adapt the coefficients used to estimate reference evapotranspiration, an input data.

Those measurements were made in Estação Experimental António Teixeira in Sorraia Valley, under sprinkler irrigation by pivot. Also at the station, 4 capacitive probes were installed, from different companies, which recorded the water content in the soil.

Crop evapotranspiration was calculated based on the reference evapotranspiration, obtained through the weather station of IPMA at Estação Experimental António Teixeira, and the crop coefficient, which has been adapted for this study. The crop was not affected by the water stress effect.

Comparing results, it can be concluded that there is a good fit between both.

Keywords: Maize, evapotranspiration, soil water balance, capacitive probes, gravimetric method

ÍNDICE

1	Introdução	3
2	Revisão Bibliográfica	4
2.1	Milho	4
2.1.1	Caracterização morfológica.....	4
2.1.2	Fases de desenvolvimento do milho	5
2.1.3	Produção da cultura do milho.....	7
2.2	Sistema de rega – pivot.....	8
2.3	Gestão da rega	9
2.3.1	Balanço hídrico do solo	10
2.3.2	Medição do teor de água do solo	11
2.3.3	Capacidade de campo e coeficiente de emurchecimento.....	13
2.3.4	Reserva de água e reserva de água facilmente utilizável do solo	13
2.4	Modelação da evapotranspiração.....	14
2.4.1	A equação de Penman-Monteith	14
2.4.2	Estimativa da evapotranspiração de referência (ET _o)	15
2.4.3	Coeficiente cultural dual	16
2.4.4	Estimativa da evapotranspiração cultural (ET _c).....	17
2.4.5	Coeficiente cultural do milho	19
3	Materiais e Métodos	20
3.1	Descrição do local.....	20
3.1.1	Caracterização edáfica.....	21
3.1.2	Caracterização climática	21
3.2	Itinerário técnico das operações culturais.....	23
3.3	Condução de rega.....	23
3.4	Medição da água no solo	25
3.5	Instalação de sondas capacitivas.....	27
3.6	Determinação dos parâmetros hídricos do solo.....	27

3.6.1	Capacidade de campo e coeficiente de emurchecimento.....	27
3.7	Balanço hídrico do solo	28
3.7.1	Estimativa da evapotranspiração cultural	28
3.7.2	Software gestão de água no solo	29
4	Resultados e Discussão	30
4.1	Estimativa de ETo	30
4.2	Coeficiente cultural.....	30
4.3	Estimativa de ETc	32
4.4	Precipitação e dotações de rega	32
4.5	Seguimento do estado hídrico do solo por sondas capacitivas.....	33
4.6	Balanço hídrico do solo: sondas capacitivas	36
4.7	Balanço hídrico do solo: modelo	38
4.7.1	Teor de água no solo observado.....	38
5	Conclusão	40
6	Bibliografia	41

Lista de Quadros

Quadro 1 - Produção de milho em Portugal (adaptado INE, 2016)	7
Quadro 2 - Granulometria do solo na área abrangida pelo pivot.....	21
Quadro 3 - Operações culturais realizadas na área de estudo	23
Quadro 4 - Dotações de rega aconselhadas por cada empresa versus dotação real aplicada.....	24
Quadro 5 - Valores de Kc para a cultura do milho (fonte: Tabela 17 boletim FAO 56)	31
Quadro 6 - Valores de Kc obtidos e altura da cultura	31
Quadro 7 - Duração de cada período de desenvolvimento da cultura	31

Lista de Figuras

Figura 1 - Crescimento e desenvolvimento do milho. Fonte: Abendroth, L (2014).	6
Figura 2 - Área de milho em Portugal. Fonte: ANPROMIS 2016	8
Figura 3 - Balanço hídrico do solo. Fonte: Oliveira (2011)	11
Figura 4 - Curva do coeficiente cultural ao longo do ciclo cultural. Fonte: Allen et al., 1998 .	18
Figura 5 - Área de estudo e local de instalação das sondas.	20
Figura 6 - Diagrama ombrotérmico para Coruche, média de 30 anos (1941 – 1970) (Ferreira Gama, 1987).....	22
Figura 7 - Diagrama ombrotérmico de Gaussen para Coruche, 2016.....	22
Figura 8 Dotações de rega aconselhadas por cada empresa versus dotação real aplicada .	24
Figura 9 - Sonda de meia cana e caixas de armazenamento de amostras de solo.	25
Figura 10 - Balança de precisão e estufa de secagem de amostras de solo.	26
Figura 11 – (a) – Gráfico resultante do balanço hídrico; (b) - humidade do solo para diferentes profundidades.....	29
Figura 12 - Evapotranspiração de referência para a zona de Coruche	30
Figura 13 - Coeficiente cultural ao longo do ciclo da cultura.....	31
Figura 14 - Evolução de ET_c e K_{cb} , ET_o , estimado pela equação de Penman-Monteith.....	32
Figura 15 - Entradas de água no solo (dotações aplicadas + precipitação)	33
Figura 16 - Teor de água no solo, nos diferentes níveis de profundidade, da empresa 1	34
Figura 17 - Teor de água no solo, nos diferentes níveis de profundidade, da empresa 2	34
Figura 18 - Teor de água no solo, nos diferentes níveis de profundidade, da empresa 3	35
Figura 19 - Teor de água no solo, nos diferentes níveis de profundidade, da empresa 4	35
Figura 20 – Armazenamento de água no solo resultante do balanço hídrico fornecido pela empresa 1	36
Figura 21 - Armazenamento de água no solo resultante do balanço hídrico fornecido pela empresa 2	37
Figura 22- Armazenamento de água no solo resultante do balanço hídrico fornecido pela empresa 3	37

Figura 23 - Armazenamento de água no solo resultante do balanço hídrico fornecido pela empresa 4	37
Figura 24 - Teor de água no solo estimado a partir do balanço hídrico (em relação ao limite inferior de água facilmente disponível)	38
Figura 25 - Comparação entre o armazenamento simulado pelo balanço hídrico e calculado com base nas medições gravimétricas do solo (média de 6 profundidades de cada ponto) em percentagem de água total armazenada	39

Lista de Símbolos

AA – água armazenada na zona radicular [L/m² ou m³/ha]

Ac – ascensão capilar [mm/dia]

D – percolação profunda [mm/dia]

e_s - pressão de vapor de saturação do ar a 2 metros de altura [kPa]

e_a - pressão de vapor real [kPa]

ET - evapotranspiração [mm/dia]

ETa – evapotranspiração real [mm/dia]

ETc – evapotranspiração cultural [mm/dia]

ETo – evapotranspiração de referência [mm/dia]

Es – escoamento superficial [mm]

G - densidade de fluxo de calor para o solo [MJ m⁻² d⁻¹]

h – altura média da cultura [m]

i – n^o do dia desde a sementeira

I – dotação de rega [mm/dia]

K_{cb} - coeficiente cultural basal

K_{cb (i)} - K_{cb} para o período de desenvolvimento rápido ou período final

K_c - coeficiente cultural

K_{c-ini} - coeficiente cultural inicial

K_{c-mid} - coeficiente cultural no meio do ciclo

K_{c-end} - coeficiente cultural final

K_{c max} - coeficiente cultural máximo

K_{cb mid} – coeficiente cultural basal

K_{cb mid (tab)} – coeficiente cultural basal tabelado

K_{cb next} - K_{cb} do período seguinte

K_{cb prev} - K_{cb} do período

K_e - coeficiente de evaporação da água do solo

K_r - coeficiente de redução da evaporação

$\Sigma(L_{prev})$ - somatório da nº de dias desde o início da sementeira

L_{stage} - nº de dias do período em questão

P – precipitação [mm/dia]

$P_{húmido}$ - massa da amostra húmida do solo [kg]

P_{seco} - massa da amostra [kg]

R – escoamento superficial [mm]

RFU – limite de água facilmente disponível [mm]

RH_{min} – humidade relativa mínima

Rn – balanço da radiação na superfície da cultura [$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$]

RU – reserva útil [mm]

T - temperatura a 2 metros de altura [$^{\circ}C$]

u_2 - velocidade do vento a 2 metros de altura [$m\ s^{-1}$]

z – profundidade radicular [mm]

ΔS - variação do armazenamento de água no solo [mm/dia]

γ – constante psicrométrica ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$)

θ - teor de água no solo em volume ou fracção volumétrica (m^3/m^3)

Lista de Abreviaturas

ANPROMIS - Associação Nacional dos Produtores de Milho e Sorgo

CC - capacidade de campo

CE – coeficiente de emurchecimento

Dap – densidade aparente do solo

FDR - reflectometria no domínio de frequência

few - fração da superfície de solo na qual ocorre a maior parte da evaporação

INE – Instituto Nacional de Estatística

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

TDR - reflectometria no domínio do tempo

1 Introdução

O presente trabalho foi realizado na Estação Experimental António Teixeira em Coruche, numa área de 15 ha regada, cultivada de milho, área essa que é explorada pela Associação Nacional dos Produtores de Milho e Sorgo – ANPROMIS. No âmbito da gestão da rega foi-me possibilitada a realização do estudo que se segue.

O milho é na atualidade a cultura arvense de maior expressão em Portugal, tanto para a produção de silagem como de grão; ocupa cerca de 120 mil hectares em Portugal, uma área que tem vindo a diminuir visto que em 2004 havia 214 mil hectares com esta cultura (ANPROMIS, 2016). O milho tem sido utilizado para consumo humano embora, em termos globais, o maior uso seja para o consumo animal (Tollenaar et al. 1999). A excelente capacidade de adaptação e de alta produtividade de milho como uma colheita de alimentos, ração e forragem levaram à sua produção em grande escala, com área cultivada em expansão, em termos globais, em detrimento de outras culturas (Bennetzen et al. 2009).

No futuro próximo, a agricultura regada sofrerá com a escassez de água, um problema com tendência de agravamento. O abastecimento de água insuficiente para rega de conforto será a norma e não a exceção, e assim deverá ser contabilizada a produção não por unidade de área, mas por unidade de água despendida (Fereres et. al. 2007).

Existem duas questões que se impõem quando se trata de condução de água de rega: quando e quanto regar. A resposta a estas duas simples questões permite que, ao longo do ciclo da cultura, se possam aplicar atempadamente as dotações corretas correspondentes às necessidades da cultura. Como afirma Shahidian (2014), a função da rega é garantir que a água nunca seja um fator limitante ao crescimento ótimo das culturas.

O estudo da evapotranspiração (ET) é importante para permitir uma melhor gestão da rega e, como consequência, dos recursos hídricos. A sua modelação requer parâmetros adequados à cultura, nomeadamente o coeficiente cultural, que neste trabalho se pretende verificar, e ajustar se necessário, através da comparação entre o estado hídrico do solo obtido por modelação (balanço hídrico) e por observação direta, em milho.

O objetivo deste trabalho foi estimar o teor de água no solo para a cultura de milho regada por pivot, com base num modelo simples do balanço hídrico, em que se determina a variação de armazenamento de água através de todas as entradas (rega, precipitação e ascensão capilar) e saídas (evapotranspiração cultural, escoamento superficial e percolação profunda), comparando-o com as medições de teor de água do solo recorrendo ao método gravimétrico, para dessa forma ajuizar da adequação dos coeficientes usados na estimativa da evapotranspiração real, um dado de entrada no modelo.

2 Revisão Bibliográfica

Serão abordados tópicos progressivamente relevantes para o objetivo do trabalho, na seguinte sequência.

1. Cultura
2. Sistema de rega
3. Gestão de rega
4. Modelação da evapotranspiração cultural

2.1 Milho

2.1.1 Caracterização morfológica

O milho (*Zea mays* L.) é uma espécie monocotiledónea, pertencente à família das gramíneas com um ciclo biológico relativamente curto. Tem como característica a presença de flores unissexuais geralmente em inflorescências masculinas e femininas separadas na mesma planta (Bastos 1987).

As plantas tendem a apresentar uma estrutura vigorosa de modo a competir com as infestantes e resistir a doenças, pragas e fungos. Esta característica pressupõe um crescimento tanto da parte aérea como subterrânea, de modo a garantir uma maior área de absorção de luz, água e nutrientes (Nelson et al. 1984).

As plantas apresentam folhas dísticas, com bainhas sobrepostas, longas e largas. De modo a captar maior quantidade de energia solar, a folha de milho tem a capacidade de formar ângulos retos com a direção dos feixes de luz. Com um único lançamento dominante, pode ter poucos filhos na base aumentando a sua área fotossintética, sendo importante em baixas densidades de plantas (Tollenaar et al. 1999).

A inflorescência masculina (panícula) forma uma espiga central com 3 a 10 filas de espiguetas emparelhadas. Estas são formadas por duas glumas que envolvem duas flores, em que cada flor contém duas glumelas finas que cobrem os estames.

As inflorescências femininas (maçarocas) aparecem nas axilas foliares e agrupam-se em espigas compostas por 12 a 25 linhas de espiguetas incertas, em que cada espiguetas é composta por duas glumelas que cobrem duas flores em que uma delas aborta (Tollenaar and Dwyer 1999).

A flor propriamente dita compõe-se de seis brácteas foliares pequenas que envolvem o ovário globuloso de 2,3 a 2,6 mm de diâmetro e é terminada em estilo longitudinal, que

permite exceder a borda das brácteas em forma de barbas, cuja cor esbranquiçada aparece mais tarde. Recebe diretamente pólen por não existir estigma, permanecendo colado à mucilagem que a cobre. Mas elevadas temperaturas coincidentes com fortes ventos, podem produzir a sua dessecação, o que impossibilita a fecundação do óvulo. Como, porém, o milho é uma planta de fecundação cruzada, não é raro existirem casos de autofecundação (6% dos casos, Melo 1986).

2.1.2 Fases de desenvolvimento do milho

A necessidade de uma boa gestão da cultura do milho passa pela compreensão dos seus estados de desenvolvimento. Um produtor que domine os conhecimentos de milho pode usar práticas de produção mais eficientes para obter maiores rendimentos e lucros.

Segundo Abendroth (2014) as fases de desenvolvimento são duas:

- Fase vegetativa
 - VE - emergência
 - V1 – primeira folha expandida
 - V2 – segunda folha expandida
 - V4 – quarta folha expandida
 - V6 – sexta folha expandida
 - V10 – décima folha expandida
 - V14 – décima-quarta folha expandida
 - VT – embandeiramento
- Fase reprodutiva
 - R1 – aparecimento das sedas - *silking*
 - R2 – emborrachamento - *blister*
 - R3 – leitosa - *milk*
 - R4 – pastosa - *dough*
 - R5 – vítreo - *dent*
 - R6 – maturação fisiológica

A descrição mais aceita dos estados fenológicos, segundo Abendroth (2014), é a seguinte (Figura 1):

- VE – Neste estado ocorre a emergência em que aparecem as primeiras folhas e a semente absorve água em cerca de 30% do seu peso. A raiz cresce tanto mais rápido quanto maior a humidade existente no solo.
- V1 – Aparecimento da primeira folha que apresenta uma ponta arredondada.

- V2 – As raízes nodais começam a surgir abaixo do solo.
- V4 – Estado em que as raízes nodais são dominantes.
- V6 – É a partir da sexta folha que o afilamento começa a ser determinado, que depende da genética, das condições ambientais e do eventual nível de stress hídrico. O começo da formação do sistema radicular principal começa neste instante.
- V10 – Aparecimento das raízes adventícias nos nós mais baixos acima do solo.
- V14 – Estado fenológico de crescimento rápido. É o mais suscetível ao calor e stress hídrico. Em aproximadamente duas semanas inicia-se a floração.
- VT – Definido o número final de grãos potenciais bem como o tamanho da maçaroca.
- R1 – Começo da floração com aparecimento das sedas. Estas permanecem ativas até à polinização. O pólen cai nas sedas e fertiliza o óvulo que produz o embrião. Nesta fase o potencial número de grãos é determinado.
- R2 – As sedas começam a secar, cerca de 12 dias depois do primeiro estado, altura em que o grão é de cor branca com cerca de 85% de humidade. É neste estado que a divisão celular está completa e dá-se início ao enchimento do grão.
- R3 – Cerca 20 dias depois do primeiro estado de reprodução, o grão começa a ter a cor amarelada e com um fluido leitoso, que resulta na acumulação de amido.
- R4 – Este estado acontece entre 26 a 30 dias após o aparecimento das sedas e consiste numa rápida acumulação de amido e nutrientes (fluido pastoso).
- R5 – O grão ganha forma vítrea. A humidade do grão cai abruptamente para os 55%.
- R6 – Este último estado acontece entre 50 a 60 dias depois do primeiro (aparecimentos das sedas). Dá-se a formação do ponto negro na base do grão. Aqui acontece o bloqueio da matéria seca e dos nutrientes. É a altura em que o grão tem o seu peso máximo e está fisiologicamente maduro, com cerca de 30% de humidade.

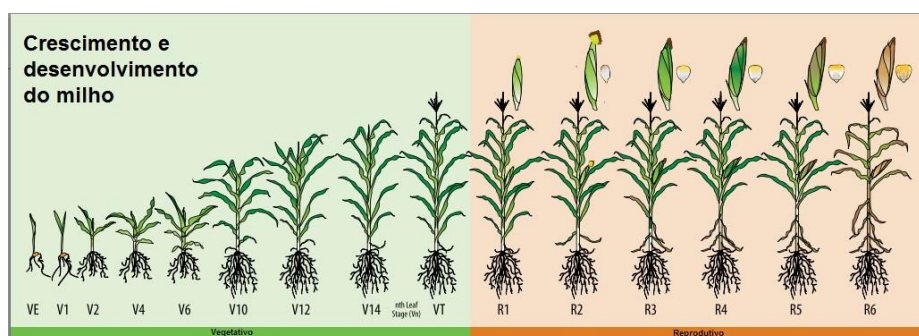


Figura 1 - Crescimento e desenvolvimento do milho. Fonte: Abendroth, L (2014).

2.1.3 Produção da cultura do milho

Nas condições climáticas de Portugal, trata-se de uma cultura de Primavera-Verão, semeada entre os meses de março e maio. Com as práticas utilizadas atualmente e com o melhoramento em novas variedades, consegue-se uma melhor adaptabilidade às nossas condições climáticas, bem como novos produtos o que se traduz num aumento significativo da produtividade (Barros and Calado 2014).

Segundo o INE (2016) a colheita das searas de milho foram tardias nesse ano de 2016, em resultado das sementeiras tardias. Nas áreas colhidas, e sobretudo devido à conjugação da utilização de variedades de ciclo mais curto com a ocorrência de picos de calor na floração, confirmaram-se as previsões de redução da produtividade face à campanha anterior. Este facto, aliado à redução da área semeada, terá fixado a produção total de milho para grão próximo de 700 mil toneladas (-15%, face a 2015).

Quadro 1 No Quadro 1 é possível observar os valores obtidos desde 2011 a 2016.

Quadro 1 - Produção de milho em Portugal (adaptado INE, 2016)

Produção 1000 t		
Ano	Milho de regadio	Milho de sequeiro
2011	785	25
2012	830	18
2013	909	20
2014	875	22
2015	809	18
2016	687	15

Segundo a ANPROMIS (2016) a área de milho tem vindo a diminuir desde 2004 em que cerca de 214 mil hectares eram área cultivada de milho, até à campanha do ano de 2016, que atingiu cerca de 120 mil hectares, como ilustrado na Figura 2.

Apesar do decréscimo da área cultivada de milho (Figura 2) na produção tem-se mantido uma flutuação constante (Quadro 1), o que demonstra um bom indicativo de produtividade.

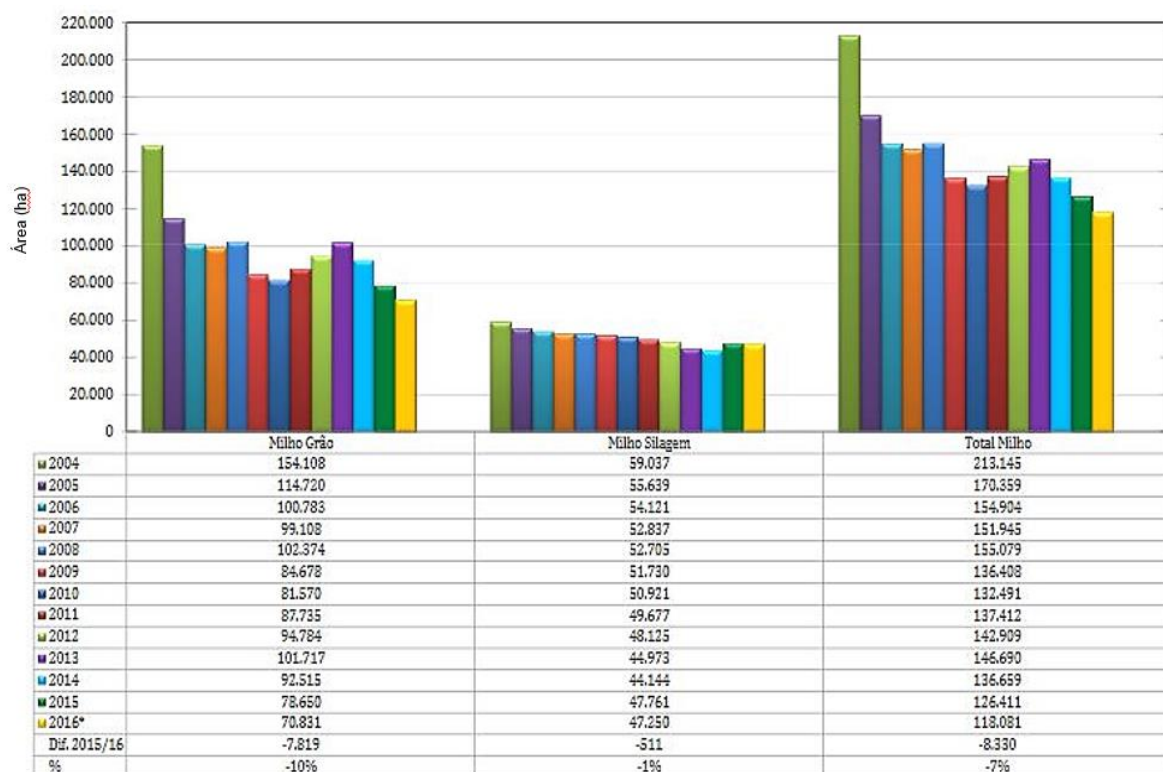


Figura 2 - Área de milho em Portugal. Fonte: ANPROMIS 2016

2.2 Sistema de rega – pivot

O sistema de rega denominado de *pivot* é constituído por uma conduta principal, apoiada em um ou mais eixos móveis, contendo aspersores ao longo dessa mesma conduta. Desenha circunferências, mantendo o centro fixo, o qual está ligado ao sistema de bombagem (Rolland 1982).

Este sistema apresenta grande importância na agricultura, pelas vantagens que apresenta, como a sua funcionalidade e pelo facto de funcionar, nos aspersores, com pressões relativamente baixas nos emissores (Raposo 1996). Segundo Oliveira (2011) os pivots são mais adequados a terrenos arenosos, os quais têm altas taxas de infiltração adequando-se mais facilmente a altas pluviometrias, como também pelo facto de estes solos apresentarem baixa taxa de problemas com atascamentos.

As componentes de um sistema de rega por pivot são as seguintes:

- Aspersores - Esta componente representa cerca de 7% do custo do pivot, mas com a responsabilidade de cerca de 70% da sua eficiência (Oliveira 2011). Estes podem ser rotativos ou estáticos e funcionam de modo a proporcionar uma taxa adequada

de cobertura (60% do diâmetro molhado), para que aconteça uma conveniente uniformidade de distribuição de água (Raposo, 1994).

- Tubagens - A tubagem principal, ou ramal principal contendo os aspersores, é normalmente em aço galvanizado, com diferentes diâmetros dependendo do comprimento do mesmo, ou seja, da área coberta e do caudal necessário (Oliveira 2011).
- Mecanismo indutor de movimento - Este sistema permite o alinhamento do pivot em função da torre da extremidade. Para que tal aconteça é necessário que as diferentes torres ou eixos, tenham uma velocidade diferente ou tempos de deslocamentos diferenciados. No topo dessas torres estão instalados os sensores de alinhamento, que servem para detetar o ângulo entre duas torres. O sinal do sensor é enviado para o motor elétrico existente no eixo de cada torre que provoca o movimento das rodas, para que estas se mantenham em constante alinhamento em relação às restantes torres (Oliveira 2011).
- Canhão terminal - No sentido de aproveitar uma maior área bem como explorar uma área quadrangular ou retangular, na extremidade terminal do ramal principal é instalado um canhão de rega (Raposo, 1996). Estes canhões podem trabalhar em contínuo de modo apenas a aumentar a área ou então de forma sectorial no caso de parcelas não circulares.
- Painel de controlo - O painel de controlo está instalado do ponto fixo do pivot. As funções são vastas como o controlo do tempo ou dotação de rega, velocidade, ordem para avançar ou para inverter a marcha, regar por sector ou até mesmo passar sem regar. Hoje em dia já se pode controlar o pivot remotamente, por computador ou telemóvel (Oliveira 2011).

2.3 Gestão da rega

O grande objetivo da condução da água de rega é responder à necessidade da determinação do volume de água necessário a cada aplicação, ou seja, quanto regar, bem como saber o intervalo máximo adequado entre regas, isto é, quando regar.

É consensual que a rentabilidade da produção de culturas regadas está diretamente relacionada com a boa gestão da água de rega. Aplicar demasiada água pode provocar lixiviação de nutrientes, erosão, lençóis freáticos elevados. Demasiada água no momento errado pode retardar o crescimento da produção da planta. Pouca água em estados críticos da planta pode reduzir significativamente a produção. Steduto et al. (2012) afirmam que o fator de resposta ao rendimento (K_y) capta a essência das complexas ligações entre

produção e uso da água por uma cultura, onde muitos processos biológicos, físicos e químicos estão envolvidos.

A gestão da rega permite controlar a humidade do solo de modo a que uma quantidade ótima de água seja aplicada em momentos apropriados, o que leva a um aumento significativo da produção, ou até mesmo uma redução nos custos. Assim o primeiro passo para uma boa gestão da água de rega é o conhecimento das relações básicas entre solo, água e cultura.

2.3.1 Balanço hídrico do solo

Os métodos hidrológicos para determinar a ET real (ETa) pressupõem a aplicação da equação do balanço hídrico, em que todos os termos são medidos ou diretamente estimados, exceto a ETa, que é calculada como um resíduo (Ferreira, 2017). Compreende-se por entradas de água, a rega ou precipitação e por saídas ETa, ou seja, desprezam-se frequentemente componentes menores dificilmente quantificáveis.

Independentemente da medição do valor de ETa existe a necessidade de recorrer à estimativa do balanço hídrico do solo com o propósito de entender o impacto da rega ou estimar as dotações úteis de rega, número de regas e intervalo entre regas, bem como deduzir as necessidades hídricas da cultura ao longo do seu ciclo vegetativo.

A variação do armazenamento (mm) depende do teor de água no solo (θ) na profundidade considerada (z), sendo dada por $\Delta S = \Delta \theta \cdot z$.

Para que não haja uma aplicação desnecessária existe a necessidade de saber a quantidade de água no solo no início do período em que se começa a regar, e a partir desse momento contabilizar todas as entradas (dotações de rega e precipitação) e saídas (evapotranspiração e escoamentos se existirem).

Considerando a camada de solo explorada pelas raízes da cultura, a uma profundidade z durante um dado período a equação do balanço hídrico é dada por:

$$\Delta S = P + I + Ac - R - D - ETc \pm Es \quad (1)$$

onde:

ΔS – variação do armazenamento de água no solo (mm/dia);

P – precipitação (mm/dia);

I – rega (mm/dia);

R – escoamento superficial (mm/dia);

A_c – ascensão capilar (mm/dia);

D – percolação profunda (mm/dia);

ET_c – evapotranspiração cultural (mm/dia);

E_s – escoamento superficial (mm/dia).

A figura seguinte - Figura 3 – mostra os termos do balanço hídrico do solo.

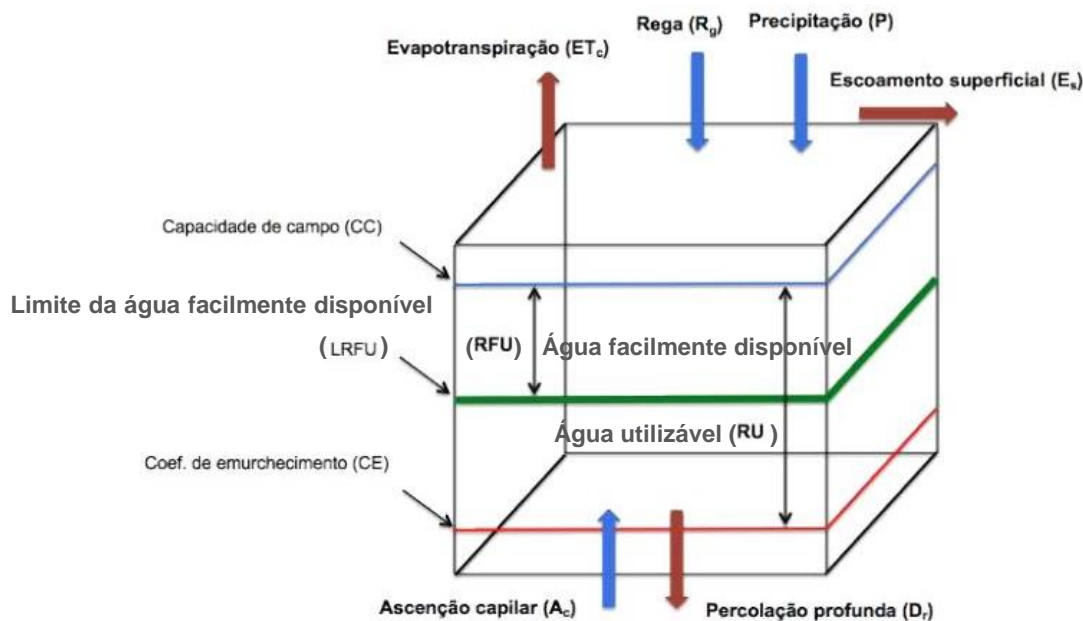


Figura 3 - Balanço hídrico do solo. Fonte: Oliveira (2011)

A utilização da equação do balanço hídrico pode ser feita à escala da parcela, através da medição de todas as componentes, nomeadamente a variação do armazenamento (com sonda de neutrões, TDR ou outro método adequado), sendo que a principal dificuldade reside na acessibilidade às zonas do solo exploradas pelas raízes mais profundas e à heterogeneidade espacial da sua distribuição (Ferreira, 1996), o que no caso desta cultura não constitui fator limitante à aplicação do método.

2.3.2 Medição do teor de água do solo

A necessidade de conhecer a quantidade de água existente num solo é fundamental, para que haja uma precisão nas metodologias aplicadas a este tipo de medição, isto é, para que se possa aplicar a equação do balanço hídrico (equação (1)) ou saber o estado hídrico do

solo, visto como um indicador de stress. Cada vez mais, existe a necessidade de obter resultados imediatos com precisão e exatidão através de uma monitorização contínua, possível acesso remoto e com baixa taxa de perturbação do solo.

Esta medição pode ser realizada por duas vias, método direto (método gravimétrico), ou por métodos indiretos.

Kutílek et. al. (1994), descrevem o método gravimétrico como o método direto de medição de água no solo, com a característica de este ser bastante preciso, daí a sua utilidade como método de calibração de outros métodos (indiretos). Como contrapartida pode trazer algumas limitações em termos práticos, por ser um método destrutivo bem como pelo tempo necessário para obtenção dos dados.

Nos métodos indiretos a sonda de neutrões é o equipamento que mais tem sido utilizado, permitindo a monitorização do teor de humidade através da perda de energia de neutrões rápidos emitidos por uma fonte radioativa. No entanto, as normas de licença, treino e segurança relativas à fonte radioativa nesses dispositivos tornam o seu uso caro e impedem o uso em algumas situações, como monitorização autónoma (S. R. Evett et al. 1995). Assim, outro segmento de sensores apareceu baseado no uso da constante dielétrica do solo. Hoje em dia é proibida a sua utilização na União Europeia.

Os sensores dielétricos oferecem uma alternativa potencial à sonda de neutrões para a determinação de humidade do solo e têm recebido recentemente uma atenção significativa (Mwale et al. 2005). A constante dielétrica do solo, é determinada predominantemente pelo teor de humidade do solo. São conhecidas duas grandes categorias de sensores dielétricos: sensores de reflectometria no domínio de frequência (FDR) e sensores de reflectometria no domínio do tempo (TDR).

S. R. Evett et al. (1995) concluíram que as sondas FDR têm uma precisão limitada em solos heterogéneos, pois há evidência experimental sugerindo que as heterogeneidades em pequena escala podem afetar a fiabilidade das leituras das sondas capacitivas; já em solos homogéneos isso pode não ser totalmente verdadeiro. Assim, afirmam que os bons resultados que obtiveram na comparação com a sonda de neutrões, ilustram ainda mais a utilidade desta técnica, pelo que optam pela sua utilização. Porém, Ventura et al. (2010) concluíram que o mais fiável e preciso método indireto é a medição através da sonda de neutrões, devido ao resultados obtidos não apresentarem sensibilidade às variações da temperatura do solo.

Mwale et al. (2005) revelaram que, no seu estudo, o desempenho da sonda capacitiva é variável. Nas condições em que o estudo foi realizado, a utilidade dos sensores FDR como alternativa à sonda de neutrões ou gravimetria é duvidosa, visto aquela ter sobrestimado

os valores de humidade do solo. No entanto, e uma vez que a sonda capacitiva respondeu bem a alterações de humidade do solo, pode ser útil para detetar taxas de alteração em vez de valores absolutos.

Steven et al. (2006) fizeram uma comparação entre sondas capacitivas (FRD), sonda de neutrões e um sensor TDR convencional e, através dos resultados obtidos, concluíram que os sensores FDR apresentam sensibilidade à temperatura, sendo o sensor TDR convencional o menos sensível e a sonda de neutrões nada sensível. A completar, concluiu-se também que através de uma equação de calibração se consegue valores mais fiáveis.

Hua et al. (2016) afirmam que, hoje em dia, métodos de medição baseados na teoria dielétrica são amplamente utilizados devido às suas vantagens de alta precisão, medição em tempo real e configuração conveniente.

A sonda conhecida como EnviroScan é uma sonda de capacitância multisensor. É composta por vários sensores de capacitância que são colocados um acima do outro. A sonda EnviroScan permanece no tubo de PVC de proteção para o período de medição. A característica extra desta sonda é que ela pode medir o teor de água do solo em intervalos regulares definidos pelo utilizador. Juntamente com a instalação da sonda, um registador de dados e um painel solar são instalados.

2.3.3 Capacidade de campo e coeficiente de emurchecimento

A capacidade de campo (CC) é a condição correspondente à quantidade de água na zona das raízes a partir da qual a drenagem se torna nula, e o coeficiente de emurchecimento (CE) a condição abaixo da qual as forças de adsorção do solo ultrapassam as forças que as plantas conseguem exercer para extrair a água para o seu desenvolvimento.

2.3.4 Reserva de água e reserva de água facilmente utilizável do solo

A reserva útil resulta da diferença entre o teor de água no limite superior da capacidade de campo (θ_{CC}) e do limite inferior do teor de água no coeficiente de emurchecimento (θ_{CE}), na zona das raízes, multiplicada pela profundidade, traduzindo-se na seguinte equação.

$$RU = (\theta_{CC} - \theta_{CE}) \cdot z \quad (13)$$

em que:

RU – reserva útil (mm);

θ_{CC} – teor de água na capacidade de campo, em volume (m^3/m^3);

θ_{CE} – teor de água no coeficiente de emurchecimento, em volume (m^3/m^3);

z – profundidade radicular (mm).

A reserva de água facilmente utilizável (RFU) é definida como a água facilmente extraível pelas plantas na zona radicular para a qual $ET_a = ET_c$, ou seja, $ET_a = ET_c = ET_0 \cdot K_c$. Para ET sem existência de stress hídrico, a dotação máxima de rega e o intervalo entre regas pressupõem que o teor de água no solo, na zona das raízes varie entre o seu limite superior, ou seja o teor de água na capacidade de campo (θ_{CC}) e um limite inferior, definido por $\theta_{CC} \times z - RFU$, em que RFU representa a fração de reserva útil que é facilmente extraível pelo sistema radicular, definido por:

$$RFU = RU \cdot p$$

em que:

RFU – reserva de água facilmente disponível (mm)

p – fração da reserva utilizável em que $ET_a = ET_c$.

2.4 Modelação da evapotranspiração

Na maioria das situações práticas em que são necessários valores de ET, os recursos disponíveis não são suficientes para permitir o uso das técnicas de medição de ET e em vez disso são usados modelos. Com a utilização facilitada de estações meteorológicas automáticas, que fornecem dados de várias variáveis, como temperatura e humidade do ar, velocidade do vento, radiação e precipitação, está facilitada a utilização de modelos que procuram estimar a ET de uma cultura de referência a partir destes dados do clima próximo da superfície.

2.4.1 A equação de Penman-Monteith

Penman (1948) foi o primeiro a desenhar uma equação baseada na combinação entre a equação do balanço de energia e equações para as transferências aerodinâmicas da superfície para estimar a ET de uma cultura de referência. Basicamente esta equação baseia-se na energia necessária para a evaporação e a capacidade de remoção de vapor de água pela atmosfera. Existem algumas limitações na sua aplicação a cobertos vegetais porque foi concebida para a determinação da evaporação a partir de uma superfície livre

de água correspondendo ao pressuposto de que a ET apenas é controlada pelos fatores meteorológicos na ausência de stress hídrico. No entanto, a função vento usada contempla um fator que compensa, de forma empírica, a resistência estomática de um coberto de referência. O modelo é válido no pressuposto de que o coberto vegetal por ser reduzido a uma grande superfície uniforme e homogênea, pelo que assume a existência de uma superfície fictícia saturada à mesma temperatura da superfície de referência do coberto e de uma resistência adicional às transferências de calor sensível e latente.

Monteith (1965) de modo a generalizar a equação de Penman, para qualquer coberto vegetal, em qualquer condição de stress, introduziu na sua equação uma resistência de superfície para o vapor de água (resistência estomática). A resistência estomática é normalmente medida por porômetros ou calculada a partir de modelos.

Na aplicação a um coberto em geral, Kjelgaard & Stockle (2001) afirmam que o parâmetro de resistência superficial no modelo P-M é particularmente difícil de estimar devido à influência combinada de planta, solo e fatores climáticos que afetam o seu valor.

Também no estudo de Perez et al. (2006) se apresenta uma limitação a esta equação, relacionada com a parametrização da resistência do coberto (resistência estomática à escala do coberto). Considerando o coberto vegetal como uma “big leaf” esta equação não permite determinar separadamente a evaporação e a transpiração o que a torna adequada sobretudo a cobertos vegetais contínuos.

A equação de Penman-Monteith aplicada à relva em condições de referência generalizou-se, demonstrando bons resultados em comparação com outras equações, como é demonstrado em Berengena et al. (2001), entre outros.

2.4.2 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)

A evapotranspiração de referência, é estimada para um coberto extenso de relva saudável de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo bem o solo e bem abastecido de água.

Para tal foram definidos valores médios de resistência aerodinâmica de uma cultura de relva com altura de 0,12 m, uma resistência de superfície constante de 70 s/m e ainda um albedo de 0,23.

O método de Penman-Monteith é frequentemente recomendado como melhor aproximação para definir ET_o. Com efeito baseia-se num amplo número de estudos que comprovam uma boa aproximação às observações obtidas em lisímetro; tem uma boa base física, como acima referido, sendo os resultados semelhantes aos obtidos pela equação de Penman

(1948) original, para as nossas condições (Ferreira, comunicação pessoal). Pode ser apresentada como Allen et al. (1998) – equação (2):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

onde:

ET_o - evapotranspiração da cultura de referência (mm d⁻¹);

R_n – balanço da radiação na superfície da cultura (MJ m⁻² d⁻¹);

G - densidade de fluxo de calor para o solo (MJ m⁻² d⁻¹);

T - temperatura a 2 metros de altura (°C);

u_2 - velocidade do vento a 2 metros de altura (m s⁻¹);

e_s - pressão de vapor de saturação do ar a 2 metros de altura (kPa);

e_a - pressão de vapor real (kPa);

γ – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

2.4.3 Coeficiente cultural dual

Numa compilação de vários estudos, Doorenbos e Pruitt (1977) e posteriormente Allen et al. (1998) divulgaram um procedimento para o cálculo da evapotranspiração de referência e dos coeficientes culturais, neste último manual introduzindo explicitamente o coeficiente cultural dual.

Na abordagem do coeficiente cultural dual, os efeitos da transpiração da cultura e da evaporação do solo são considerados separadamente. O coeficiente é dividido em duas partes: a primeira é o coeficiente cultural basal (K_{cb}) correspondente à transpiração da planta e o segundo é o coeficiente de evaporação da água do solo (K_e) correspondente à evaporação da superfície do solo, ou seja, K_{cb} representa a linha de base para K_c na ausência dos efeitos adicionais de solo molhado por rega ou precipitação, e K_e descreve o excedente da componente de evaporação direta. Se o solo estiver molhado devido à chuva ou evento de rega, K_e pode ter um grande valor. No entanto, a soma de K_{cb} e K_e nunca pode exceder um valor máximo, K_{cmax} , determinado pela energia disponível para evapotranspiração na superfície do solo. À medida que a superfície do solo se torna mais seca, K_e torna-se menor e cai para zero quando não há evaporação direta.

O procedimento FAO-56 foi testado em medições diárias de ET para culturas de feijão, milho e beterraba açucareira em Kimberly (Idaho) por Allen et al. (1996) e posteriormente em muitas outras situações. As medições foram feitas utilizando lisímetros de pesagem de precisão. Os resultados em todas as situações apresentaram erro de previsão inferior a 10% para as estimativas diárias de ET. Allen (1999) aplicou o procedimento num projeto de rega com cerca de 200 000 ha na Califórnia, onde um balanço hídrico foi usado para determinar ET dentro de $\pm 5\%$. O procedimento FAO-56 previu ET cerca de 6% maior do que o valor de ET total do projeto, determinado pelo balanço hídrico durante o período de oito anos de estudo.

Recentemente Allen et al. (2005) afirmou que o procedimento de K_c dual é útil quando são necessárias estimativas a curto prazo da evapotranspiração, por exemplo, na programação de rega para campos individuais, bem como na estimativa do consumo total de água.

2.4.4 Estimativa da evapotranspiração cultural (ET_c)

A evapotranspiração cultural é calculada pela multiplicação do coeficiente cultural pela evapotranspiração de referência – equação (3):

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (3)$$

Contudo se usarmos o valor de K_c simples, temos que ter presente que apenas representa condições típicas para a frequência de precipitação e rega, bem como o próprio sistema de rega (Allen et al. 1998).

O K_c dual consiste na soma entre o coeficiente cultural basal (K_{cb}) e o coeficiente de evaporação de água do solo (K_e), como se pode observar na Figura 4.

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (4)$$

Há uma variação do valor de K_c à medida que a cultura cresce e se desenvolve, resultante sobretudo da variação da fração de cobertura da superfície do solo pela vegetação. K_c também se altera à medida que as culturas atingem a maturação e até à senescência.

Os coeficientes culturais médios são apresentados por intermédio de uma curva cujo traçado exige o conhecimento de três valores de coeficiente cultural, que estão diretamente relacionados com os quatro períodos, inicial, desenvolvimento rápido, intermédio e final. Para o período de desenvolvimento rápido faz-se a interpolação entre os valores tabelados para o período inicial e para o intermédio.

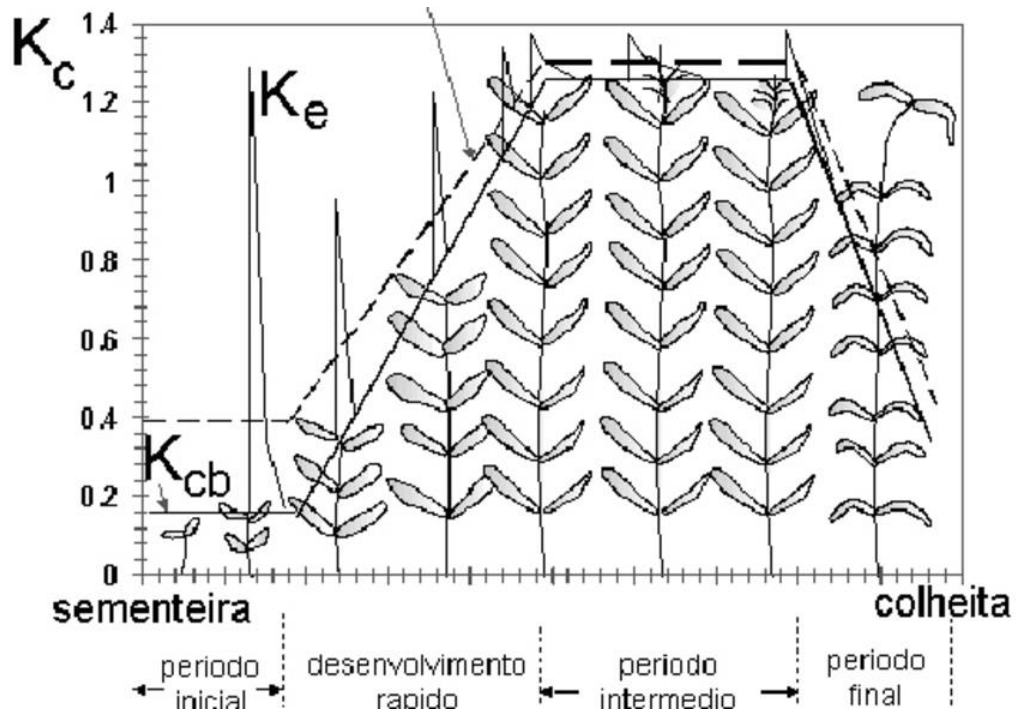


Figura 4 - Curva do coeficiente cultural ao longo do ciclo cultural. Fonte: Allen et al., 1998

Para construir uma curva de K_{cb} , é necessário calcular os valores de K_{cb} para o período de desenvolvimento rápido e para o período final o que se traduz na equação seguinte:

$$K_{cb(i)} = K_{cb\ prev} + \left[\frac{(i - \sum(L_{prev}))}{L_{stage}} \right] (K_{cb\ next} - K_{cb\ prev}) \quad (5)$$

onde:

$K_{cb(i)}$ – K_{cb} para o período de desenvolvimento rápido ou período final;

$K_{cb\ prev}$ – valor de K_{cb} do período anterior;

$K_{cb\ next}$ – valor de K_{cb} do período seguinte;

i – nº do dia desde a sementeira;

$\sum(L_{prev})$ – somatório da nº de dias desde o início da sementeira;

L_{stage} – nº de dias do período em questão.

O coeficiente de evaporação do solo (K_e) traduz a evaporação do solo húmido e calcula-se como:

$$K_e = K_r (K_{cmax} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{cmax} \quad (6)$$

onde K_r é o coeficiente de redução da evaporação quando o solo seca, de acordo com Ritchie (1972), f_{ew} fração de superfície de solo na qual ocorre a maior parte da evaporação e K_{cmax} valor máximo de K_c depois de rega ou precipitação.

2.4.5 Coeficiente cultural do milho

Segundo a FAO - Food and Agriculture Organization, o milho é uma cultura bastante eficiente em termos de produção total de matéria seca e entre os cereais é potencialmente a que apresenta produção de grãos com maior rendimento. Para a produção máxima, uma colheita de grãos de média maturidade requer entre 500 e 800 mm de água dependendo do clima. O valor de K_c em milho para grão é para a fase inicial 0,3 a 0,5 (15 a 30 dias), para o estágio de desenvolvimento 0,7 a 0,85 (30 a 45 dias), para o estágio de meia-estação 1,05 a 1,2 (30 a 45 dias), durante o estágio de final da estação 0,8 a 0,9 (10 a 30 dias) e para a época de colheita 0,55 a 0,6.

No estudo de Abedinpour (2015), este chegou à conclusão de que os valores de K_c para a cultura do milho, no desenvolvimento inicial, no desenvolvimento da cultura, na meia-estação e no final foram respectivamente 0,40 a 0,60; 0,70 a 0,80; 1,1 a 1,21 e 0,50 a 0,65.

No entanto Facchi et al. (2013) obteve os seguintes valores: $K_{c-ini} = 0,30$ a $0,40$, $K_{c-mid} = 0,96$ a $1,02$ e $K_{c-end} = 0,89$ a $0,35$, pelo que afirma que a variabilidade do K_{c-ini} se deve principalmente à frequência e intensidade de ocorrências de precipitação ou de regas na fase de crescimento inicial.

A variadíssima bibliografia refere vários valores, uns dentro da mesma gama de valores enquanto outros diferentes. Devido à incerteza dos valores de K_c a utilizar justifica-se o trabalho aqui apresentado. Não será apenas mais um estudo, mas uma forma de provar que valores de referência nem sempre se enquadram nas nossas condições de estudo. Uma causa pode estar relacionada com as diferentes variedades de milho, que teriam diferentes usos de água e padrões de evapotranspiração.

3 Materiais e Métodos

3.1 Descrição do local

O presente estudo foi realizado na Estação Experimental António Teixeira em Coruche numa área de cerca de 15 ha, em que cerca de 10 ha são regados por pivot e cerca de 5 ha por gota-a-gota subterrânea, localizado à latitude 38° 56' 38" e longitude 8° 30' 40", na zona do Perímetro de Rega do Vale do Sorraia.

A zona de estudo de que se apresentam resultados foi respeitante a milho regado por pivot, uma vez que foi o local de instalação das sondas de medição de água no solo e correspondente colheita de dados para aferição

Como o nome indica, este local é utilizado para experiências, neste caso de vários tipos de sementes de milho, vários tipos de adubos e fitofármacos, como também por várias empresas de consultoria sobre o uso eficiente da água que utilizam estes campos para fazer testes à eficiência dos seus produtos.

A área coberta por este pivot está dividida em três parcelas, sendo uma delas a zona de instalação das sondas do teor de humidade do solo, como representado na Figura 5.

No local existe ainda uma estação meteorológica pertencente ao IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera), na qual foram recolhidos todos os dados necessários à estimativa de ETo.

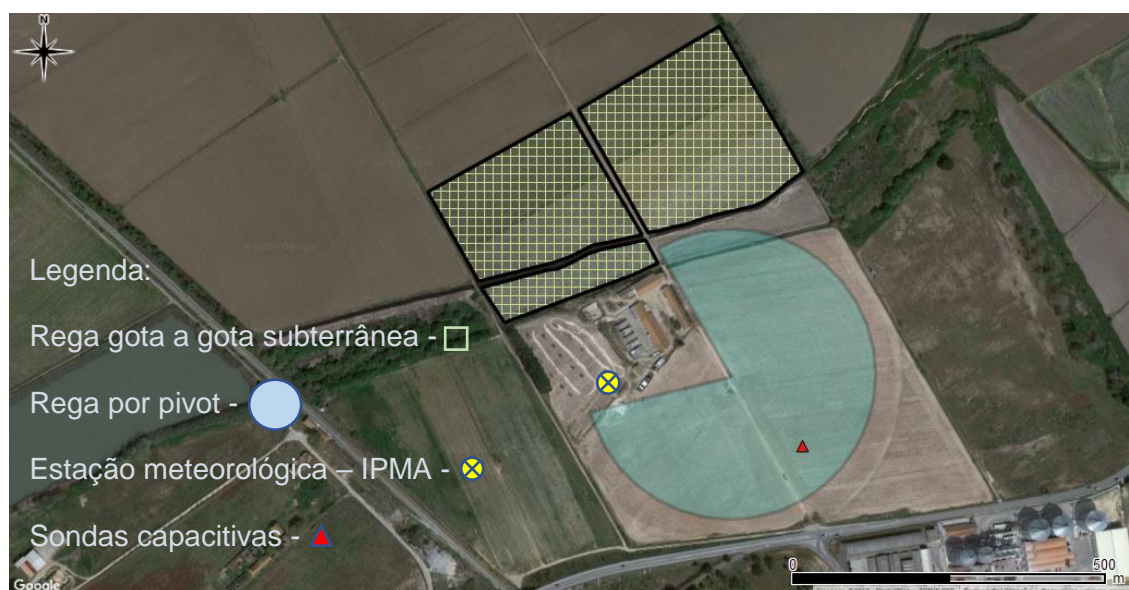


Figura 5 - Área de estudo e local de instalação das sondas.

3.1.1 Caracterização edáfica

A zona regada por pivot com 10 ha, apresenta um solo litólico não húmico, pouco insaturado, de arenitos grossos, caracterizado por apresentar textura arenosa com boa drenagem. O teor em matéria orgânica é baixo, assim como são a razão C/N e a capacidade de troca catiónica. Este perfil, (segundo Cameira 1999) apresenta três horizontes (Quadro 2):

Quadro 2 - Granulometria do solo na área abrangida pelo pivot.

Horizonte	Prof. (cm)	Granulometria (%)				Densidade aparente	θ (%)	
		areia grossa	areia fina	limo	argila		pF 2.0	pF 4.2
A	0-15	76,9	15,7	5,2	2,2	1,41	14,6	2,5
B	15-30	59,6	31,8	6,7	1,9	1,54	13,9	2,9
C	30-60	67,4	25	5,1	2,5	1,5	10,6	1,6

Através dos valores do Quadro 2 e da equação (8), obteve-se um valor de teor de água em volume de 18,5 %.

3.1.2 Caracterização climática

O clima em Coruche é temperado, e como em todo o território português a precipitação é mais intensa nos meses de Inverno, característica dos climas mediterrânicos. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a região de Coruche apresenta clima tipo Csa: temperado de tipo mediterrânico com verões quentes e secos e invernos chuvosos. Tem uma precipitação média anual de cerca de 735 mm, em que o mês mais seco é julho, e o mais quente agosto em que a temperatura média é de 23.5°C (agosto) - Figura 6 e Figura 7.

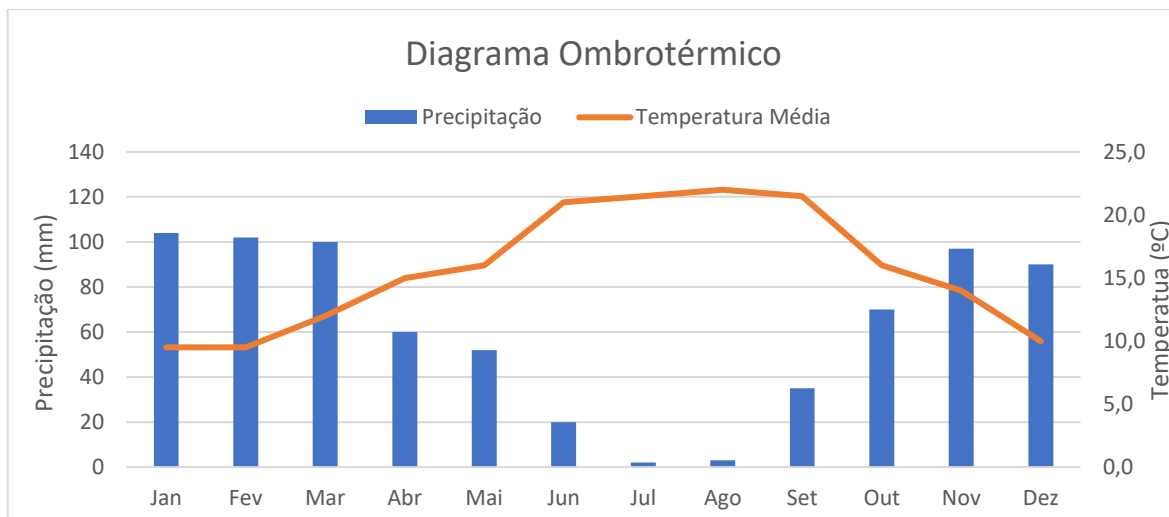


Figura 6 - Diagrama ombrotérmico para Coruche, média de 30 anos (1941 – 1970) (Ferreira Gama, 1987)

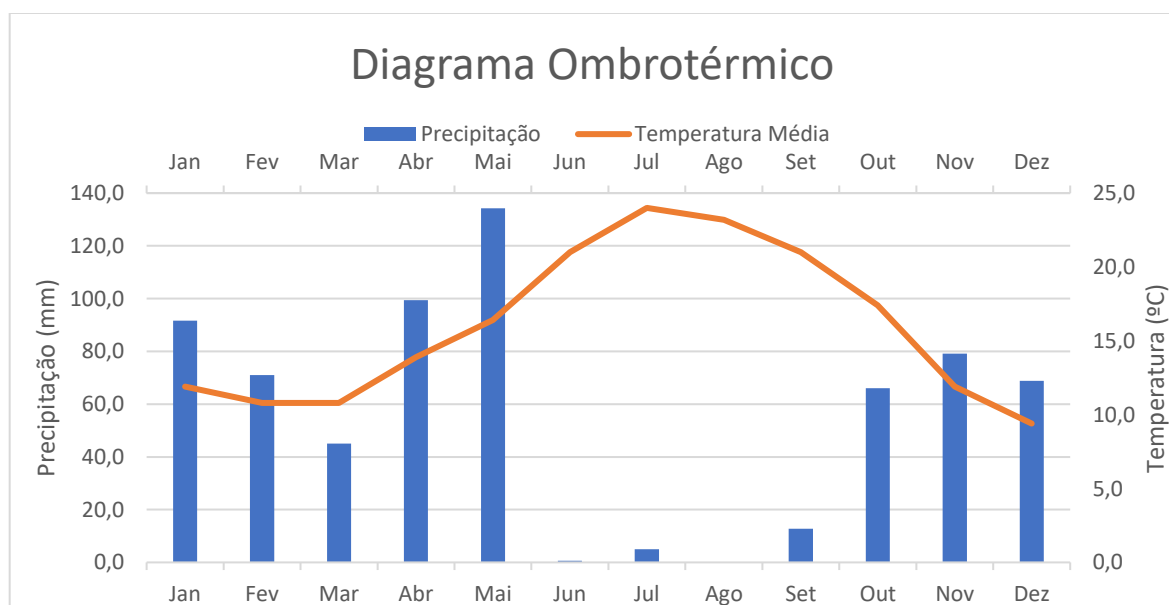


Figura 7 - Diagrama ombrotérmico de Gaussen para Coruche, 2016

De notar que existem diferenças em relação à precipitação, na comparação entre a Figura 6 e Figura 7. Em maio, observou-se uma maior ocorrência de precipitação e um Outono mais seco que o normal. A quantidade anual de precipitação é menor, totalizando os 673.7 mm. A temperatura atingiu o seu máximo em julho, com uma temperatura média de 24°C. Esta campanha teve a particularidade de ser bastante seca e quente, comparativamente com outros anos, uma vez que nos meses em que se realizou a campanha, entre meados de maio e final de setembro, houve menos precipitação.

3.2 Itinerário técnico das operações culturais

O Quadro 3 apresenta as operações realizadas e o dia da sua realização.

Quadro 3 - Operações culturais realizadas na área de estudo

Data	Operação	Taxa	Produto comercial
21/04/16	Gradagem		
27/04/16	Aplicação de herbicida	5 L/ha	Roundup
04/05/16	Gradagem		
17/05/16	Passagem Chisel		
18/05/16	Passagem KDR		
18/05/16	Adubação de fundo	200 kg/ha	Rhizovit
18/05/16	Sementeira Pivot	95 000 sem/ha	Pioneer
05/06/16	Aplicação herbicida	1,5 L/ha + 2 L/ha	Laudis+Aspect
05/06/16	Aplicação de inseticida	100 mL/ha	Decis Expert
07/06/16	Instalação Sonda - Empresa 1		
20/06/16	Aplicação adubo cobertura	400 kg/ha	D-Coder
20/06/16	Escarificação		
21/06/16	Instalação Sondas – Empresas 2, 3 e 4		
30/09/16	Colheita		

As operações culturais descritas no Quadro 3 foram as realizadas no terço do pivot em que foram instaladas as sondas de medição do teor de humidade do solo. O excesso de operações no princípio do ciclo deveu-se à quantidade de precipitação nesta altura, pelo que houve necessidade de voltar a fazer a preparação do terreno para a sementeira.

3.3 Condução de rega

A ANPROMIS foi responsável por toda a condução de rega, consultando as empresas de aconselhamento à rega, seguindo os relatórios semanais baseados nos valores das sondas instaladas pelas empresas e das previsões meteorológicas, que cada empresa estava comprometida a entregar. Os relatórios incluíam as dotações a aplicar, o dia em que aplicar, e alguma outra anotação, se necessário.

O Quadro 4 e Figura 8, representam o somatório semanal de todas as regas aplicadas/aconselhadas. A realidade das aplicações aproximou-se da informação prestada pela empresa 1, que foi a primeira empresa a instalar a sonda no local como a presente valores mais idênticos aos que foram aplicados. No entanto, como não estavam as sondas

só começaram a ser instaladas após 5 semanas da data de sementeira, existe o problema, não haver qualquer aconselhamento.

Quadro 4 - Dotações de rega aconselhadas por cada empresa versus dotação real aplicada

Dotações de Rega - Pivot					
	Empresa 1	Empresa 2	Empresa 3	Empresa 4	Real
Semana 1 (inicio)	-	-	-	-	10
Semana 2	-	-	-	-	-
Semana 3	-	-	-	-	10
Semana 4	-	-	-	-	10
Semana 5	-	-	-	-	26
Semana 6	35	-	-	-	47
Semana 7	55	-	-	-	58
Semana 8	55	-	58	-	66
Semana 9	60	-	70,2	-	75
Semana 10	67	-	47	70	73
Semana 11	59	-	49,5	77	72
Semana 12	65	-	40	74	60
Semana 13	60	18	70,1	70	63
Semana 14	55	62	23,8	56	53
Semana 15	48	59	55,2	56	51
Semana 16	45	50	63,5	49	45
Semana 17	48	44	39	45	42
Semana 18	30	36	41	30	14
Semana 19	12	37	-	-	44
Semana 20 (fim)	-	7	-	-	16

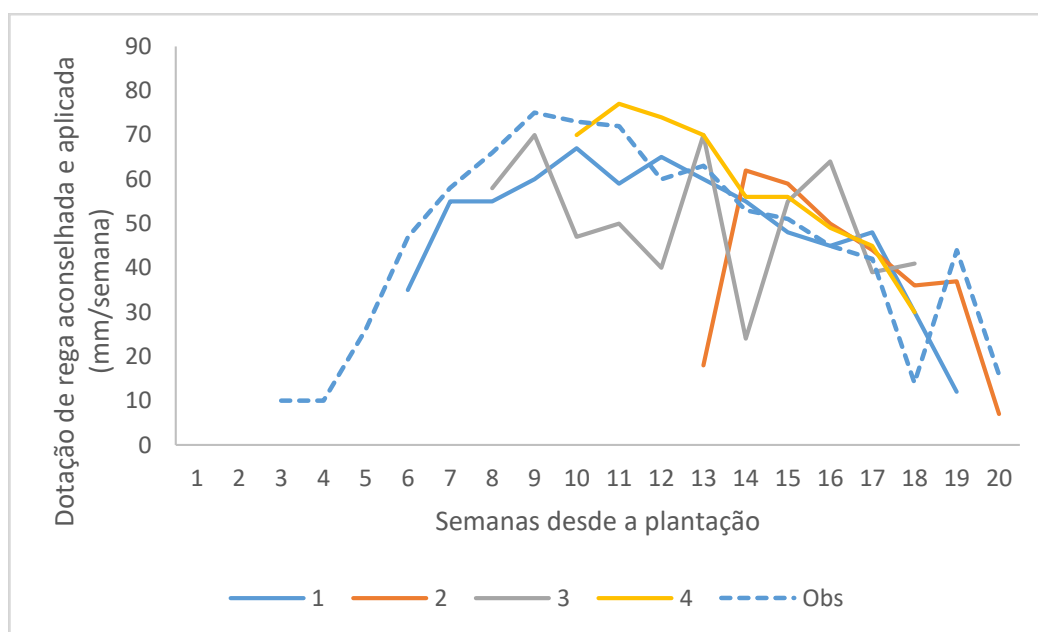


Figura 8 Dotações de rega aconselhadas por cada empresa versus dotação real aplicada

3.4 Medição da água no solo

Utilizámos o método gravimétrico que é o método tradicional de medição de água no solo e consiste em retirar amostras de solo a diferentes profundidades e medir gravimetricamente o teor de água dessas amostras. As amostras foram retiradas de profundidades onde se concentravam as raízes.

Assim, foram retiradas amostras de solo a cada 10 cm até os 50 cm de profundidade, em dois pontos, sempre entre duas plantas. Esses pontos foram considerados representativos do teor médio de água no solo, e enquadrados na zona das sondas capacitivas.

Foi utilizada uma sonda de meia cana com 50 cm, com uma fita métrica dividida em cinco partes de 10 cm e recolhidas em caixas de metal de modo a que as amostras fiquem acondicionadas, para que não haja perdas de água por evaporação.



Figura 9 - Sonda de meia cana e caixas de armazenamento de amostras de solo.

Imediatamente as amostras são pesadas para obter o peso húmido. Posteriormente são colocadas na estufa a uma temperatura de 105 °C durante 24 horas. Passadas as 24 horas em estufa foram retiradas e colocadas no dessecador de modo a arrefecer e não ganhar humidade. Posto isto foram pesadas novamente, obtendo-se assim o peso seco. Foi calculada a diferença entre o peso húmido e o peso seco, retirando também a tara da caixa e chegamos à quantidade de água existente no solo:

$$\theta_m = \frac{P_{humido} - P_{seco}}{P_{seco}} \quad (7)$$

onde:

P_{humido} – massa da amostra húmida (kg)

P_{seco} – massa da amostra seca (kg)



Figura 10 - Balança de precisão e estufa de secagem de amostras de solo.

A percentagem de água no solo, só por si, não é muito útil para determinar o momento crítico da rega, visto que a força com que a água é retida no solo varia conforme o tipo do solo. Consequentemente, estes valores devem ser relacionados com os teores de água correspondentes ao ponto de emurchecimento permanente e à capacidade de campo que variam para cada tipo de solo e devem ser determinadas localmente ou, na impossibilidade, estimados a partir de medições laboratoriais.

O teor de humidade em volume (θ_v) Representa o volume de água por unidade de volume aparente de solo, que se traduz na seguinte equação:

$$\theta_v = \theta_m * D_{ap} \quad (8)$$

em que D_{ap} é a densidade aparente do solo.

A água armazenada na zona radicular é o produto do teor de humidade em volume pela profundidade aparente do perfil de solo, z , expresso pela equação:

$$AA = \theta_v * z \quad (9)$$

É usual expressar a altura de água em mm, L/m² ou m³/ha (1mm de água = 1L/m² = 10 m³/ha).

3.5 Instalação de sondas capacitivas

No local foram instaladas quatro sondas capacitivas (FDR) de empresas distintas. Estas apenas começaram a ser instaladas depois de todas as operações culturais concluídas, de modo a assegurar a integridade e segurança do material. As sondas foram instaladas na mesma linha da cultura e distanciadas entre si de dois metros. De relembrar que são instaladas na linha da cultura entre duas plantas, por ser a zona mais representativa.

A primeira sonda foi instalada a 7 de junho e as três restantes a 21 de junho. No entanto, os aconselhamentos de rega não se iniciaram à data de instalação, como se pode verificar no Quadro 4. Todas as sondas são calibradas em laboratório às quais está associada uma equação de calibração para o tipo de solo em questão.

Para a instalação começa-se por fazer um furo à medida da sonda, posteriormente mistura-se solo do local e água, com a intenção de que não haja espaços vazios que possam servir para a infiltração da água, bem como não haja alterações das características do solo, a fim de não influenciar os resultados. Feita a colocação da sonda, é instalado o sistema de aquisição de dados (*Data Logger*) e ligado à sonda. Para finalizar, saturou-se a zona da sonda com água para atingir o máximo de saturação do solo, que futuramente vai ser relacionado com a capacidade de campo, após conveniente drenagem. Ou seja, mediu-se depois de os valores de teor de água no solo estabilizarem, e tomou-se esse valor como capacidade de campo.

3.6 Determinação dos parâmetros hídricos do solo

3.6.1 Capacidade de campo e coeficiente de emurchecimento

No Quadro 2 apresentamos valores de capacidade de campo e coeficiente emurchecimento, determinados em laboratório. Ainda assim, para perceber se os valores não fugiam à realidade, foi determinada localmente a capacidade de campo. O procedimento optado foi o seguinte: aplicamos uma quantidade de água exagerada para que o solo ficasse saturado. Após 24 horas são retiradas amostras de solo, pesadas, secas e pesadas novamente.

3.7 Balanço hídrico do solo

Neste caso específico e de forma a simplificar a equação, teve-se apenas em consideração as componentes que eram necessárias para este cálculo e também quantificáveis. Nesta situação, dadas as circunstâncias de cuidado aconselhamento de rega, justificou-se que os termos referentes à percolação profunda, escoamento superficial e sub-superficial e ascensão capilar (sabendo-se que não existe influência da toalha freática), fossem desprezados, simplificando-se assim a equação completa do balanço hídrico para a seguinte:

$$\Delta S = P + I - ET_c \quad (10)$$

obtendo-se assim o teor de água no solo para o dia i (θ_i), de:

$$\theta_i = \theta_{i-1} - \Delta S / z \quad (11)$$

Com a existência de uma estação meteorológica no local, o valor da precipitação e a estimativa da evapotranspiração são fáceis de obter. Também havia acesso às dotações de rega aplicadas (previamente são inseridas na consola do pivot). Assim, basta aplicar o cálculo direto para obter a variação do armazenamento de água no solo (10) que, convertida em teor de água no solo (11) permite a comparação com os valores obtidos pelo método gravimétrico.

3.7.1 Estimativa da evapotranspiração cultural

A estimativa da evapotranspiração de referência foi calculada com base no método de Penman-Monteith. No início da campanha foi realizada uma manutenção por parte do IPMA na estação meteorológica. Assim, aplicadas as variáveis necessárias, foram obtidos valores com extrema precisão.

O procedimento para o coeficiente cultural dual é conduzido numa base diária para aplicação computacional. Esta aproximação é recomendada para uma maior precisão do valor de K_c e consiste em:

- identificação da duração de cada período e selecionar o valor de K_{cb} adequado
- ajustar K_{cb} para as condições climáticas em questão
- construção de uma curva de K_{cb}
- determinação o valor de K_e
- cálculo ET_c , sendo o produto de ET_0 pela soma de K_{cb} com K_e

3.7.2 Software gestão de água no solo

As empresas proprietárias das sondas no local utilizam o seu próprio software de gestão de água no solo. Este software permite visualizar os dados meteorológicos, as dotações de rega aplicadas, a humidade existente no solo a cada nível de profundidade, de modo a entender a situação hídrica na zona das raízes e ainda, qual a utilização que a cultura está a fazer da água disponível ou se existem perdas por infiltração. Os dados são recolhidos automaticamente e atualizados posteriormente nas bases de dados. Como por exemplo, apresentam-se os gráficos de balanço hídrico (a) e de humidade do solo na respetiva profundidade (b), tal como estavam disponíveis para uma das empresas (Figura 11).

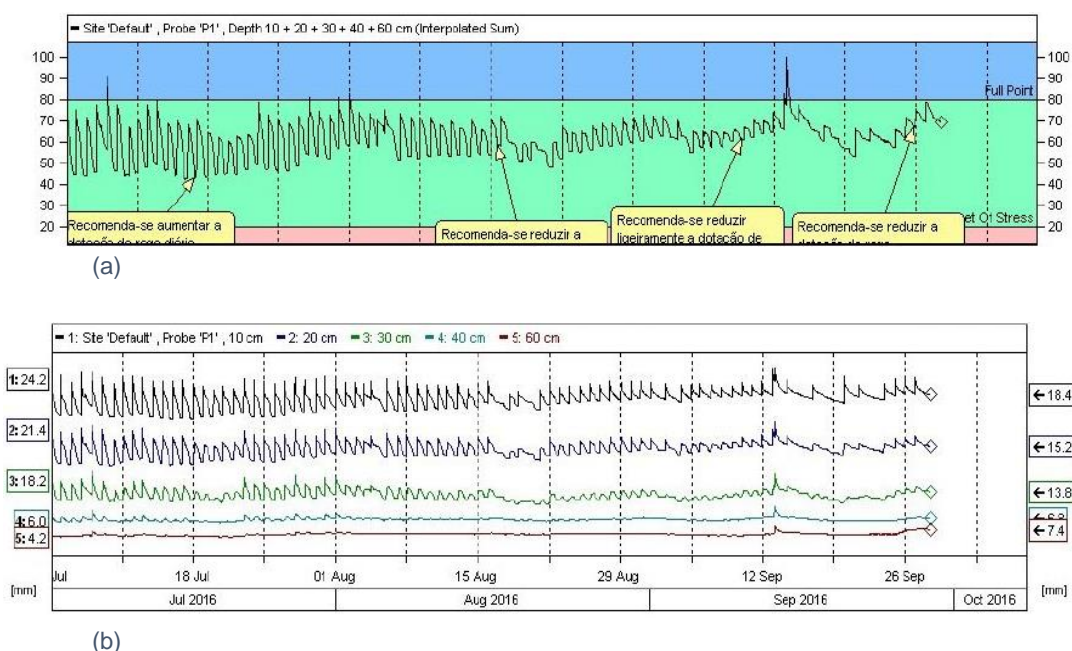


Figura 11 – (a) – Gráfico resultante do balanço hídrico; (b) - humidade do solo para diferentes profundidades

É possível, neste caso, visualizar no software da empresa apresentada, os dados da sonda e através da equação utilizada pelo fabricante, traduzir para um gráfico de balanço hídrico como exemplificado na figura anterior. Os limites da capacidade de campo e do coeficiente de emurchecimento são delimitados por cada empresa com ajuda do produtor. Já na Figura 11 (b) apenas são apresentados os valores transmitidos ao sistema de aquisição de dados por cada sensor, a cada profundidade (seis sensores em cada sonda ou ponto de medição).

4 Resultados e Discussão

4.1 Estimativa de ET_o

Como referido, os dados para a estimativa de ET_o foram recolhidos da estação do IPMA instalada no local, e tratados através do modelo de Penman-Monteith. Como é possível observar na Figura 12, o valor de ET_o entre 18 de maio e 30 de setembro variou entre cerca de 3 e 8 mm/dia, com valor médio de 5,6 mm/dia.

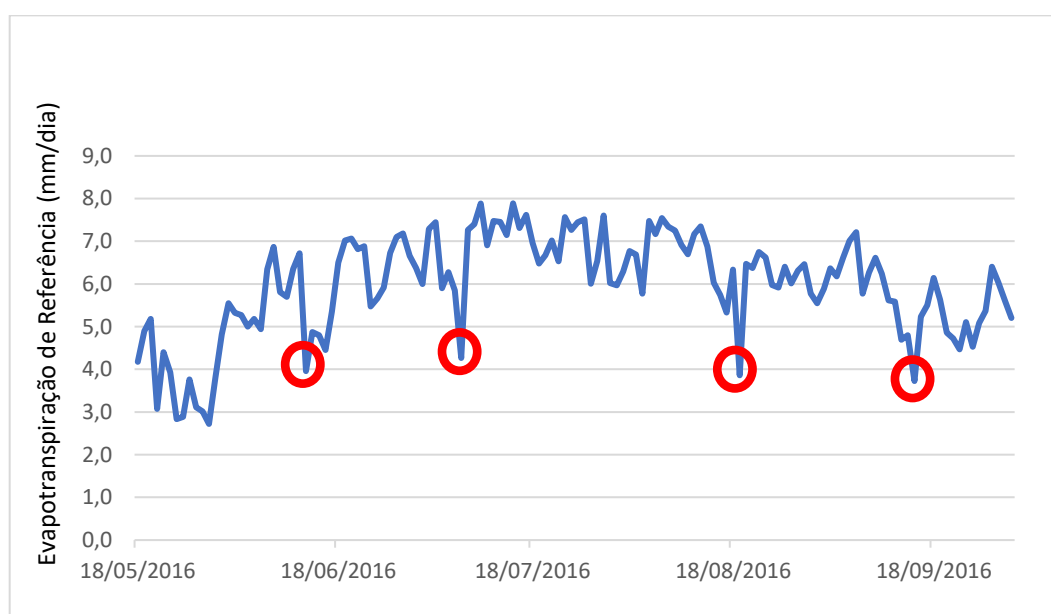


Figura 12 - Evapotranspiração de referência para a zona de Coruche

Uma vez que a radiação solar é uma das variáveis da equação de Penman-Monteith, nos dias de céu nublado os valores obtidos foram na ordem dos $15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, dando origem ao decréscimo acentuado visível nos picos assinalados.

4.2 Coeficiente cultural

Na Tabela 17 do boletim da FAO 56, é apresentado um K_{cb} inicial de 0,15, um $K_{cb \text{ mid}}$ de 1,15 e um $K_{cb \text{ final}}$ de 0,15, para a cultura do milho com humidade não superior a 18%, de acordo com o Quadro 5. Para a curva do período de crescimento rápido é utilizada a equação (5) que nos permite perceber qual o valor desde o período inicial até ao período de desenvolvimento.

Quadro 5 - Valores de K_c para a cultura do milho (fonte: Tabela 17 boletim FAO 56)

Cultura	$K_{c\text{ ini}}$	$K_{c\text{ mid}}$	$K_{c\text{ end}}$
Milho	0.15	1.15	0.15

Após correção e adaptação às condições do local de estudo dos valores de Allen et al. (1998), obtiveram-se os valores apresentados no Quadro 6 e Figura 13, que estão relacionados com a duração de cada período de desenvolvimento da cultura (Quadro 7).

Comparando como os valores referidos por Abedinpour (2015) e Facchi et al. (2013) pode-se constatar que o valor de $K_{c\text{ ini}}$ está relativamente abaixo do de $K_{c\text{ ini}}$ apresentado no Quadro 6, o que se deve à frequência e intensidade de ocorrências de precipitação ou de regas, como afirma Facchi et al. (2013).

Quadro 6 - Valores de K_c obtidos e altura da cultura

	Data	K_c	Altura (m)
Fase de estabelecimento	18/05 a 10/06	0,15	0 a 0,5
Desenvolvimento rápido	11/06 a 17/07	0,15 a 1,15	0,5 a 3,0
Fase intermédia	18/07 a 05/09	1,15	3,1
Fase final	06/09 a 30/09	1,15 a 0,15	3,1

Quadro 7 - Duração de cada período de desenvolvimento da cultura

Cultura	Init. (L_{ini})	Dev. (L_{dev})	Mid (L_{mid})	Late (L_{late})	Total (dias)
Milho	24	37	50	25	136

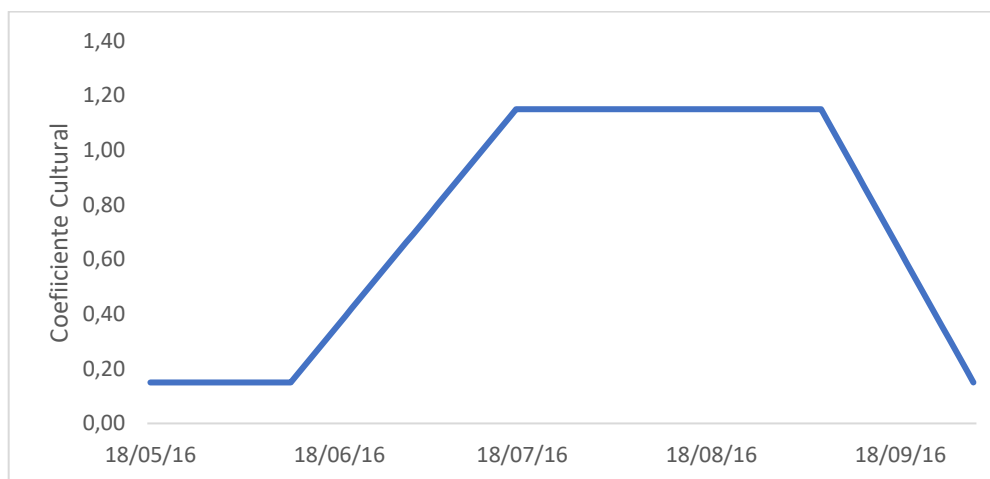


Figura 13 - Coeficiente cultural ao longo do ciclo da cultura

4.3 Estimativa de ET_c

Através dos dados obtidos de ET_o e K_{cb} , é possível chegar a uma estimativa de ET_c .

Os valores médios diários ao longo do ciclo foram de 6,6 mm/dia Figura 14. No final deste período de 136 dias, obteve-se uma estimativa de 897 mm de água por evapotranspiração, em condições de conforto, atingindo o máximo em meados de julho (cerca de 9 mm/dia).

Talvez o coeficiente cultural devesse ser ajustado em função de uma antecipação do ciclo face ao exposto.

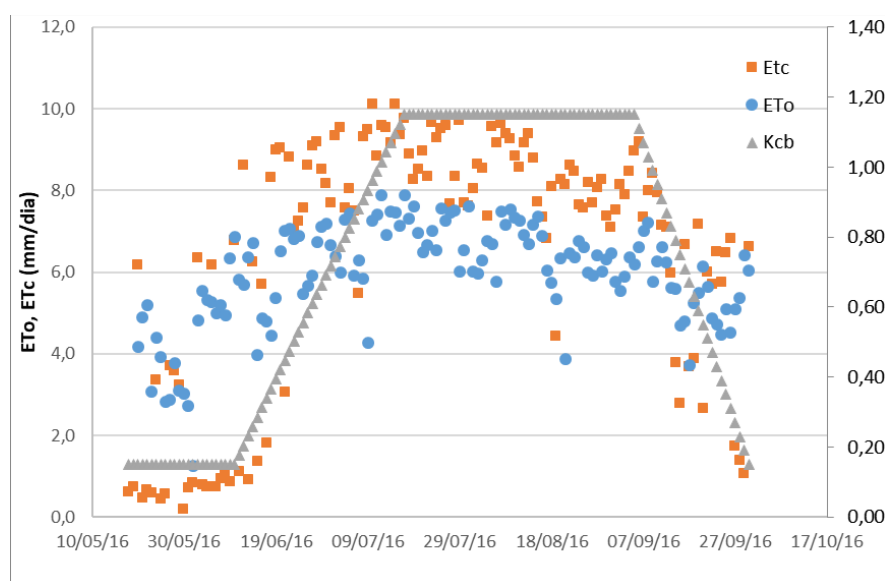


Figura 14 - Evolução de ET_c e K_{cb} , ET_o , estimado pela equação de Penman-Monteith

4.4 Precipitação e dotações de rega

Durante o ciclo de crescimento desta cultura foi registada, pela estação meteorológica instalada no local, uma precipitação total de 19,9 mm, com valores a variarem de 0,2 mm a 12,5 mm. Foi registada esta ocorrência numa fase em que as dotações de rega começam a diminuir, não afetando o desenvolvimento da cultura devido às características do solo (Figura 15).

Relativamente às dotações de rega, em média foram aplicados 8 mm/dia. No entanto, como é possível verificar (Figura 15), estas tiveram uma maior intensificação entre os períodos de 22 de junho a 21 de agosto, com valores a variar entre 8 mm e 12 mm. Foram aplicadas

estas dotações não só pelas temperaturas elevadas (34,5°C média máxima), como também pelo facto de ser a altura de maior sensibilidade ao stress hídrico por parte desta cultura, entre o período de floração e a fase de enchimento do grão. Como refere Steduto (2012), o milho é uma planta bastante sensível ao stress hídrico. Quantos mais dias esta estiver sujeita a stress no período vegetativo, menor será o seu coberto vegetal e a sua condutância estomática. Este facto leva a uma redução de produção de biomassa e por sua vez, uma redução da produção de grão. Trata-se de um fator negativo que leva a uma diminuição na fase do enchimento de grão.

Verificou-se que, desde o dia 18 de maio até ao dia 30 de setembro, foram registadas 10 ocorrências de precipitação e 103 regas, o que per fez uma aplicação de água no total de 854,9 mm.

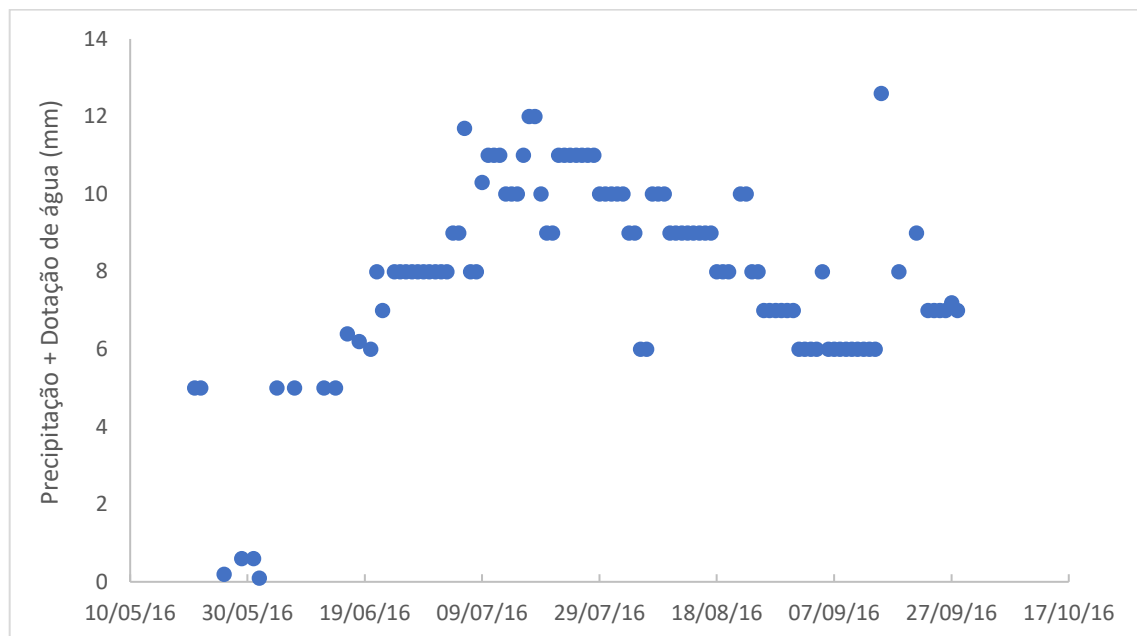


Figura 15 - Entradas de água no solo (dotações aplicadas + precipitação)

4.5 Seguimento do estado hídrico do solo por sondas capacitivas

As empresas que prestam serviço na gestão de rega recorrendo a sondas capacitivas, têm o seu próprio software de análise de dados das sondas, base de dados que é disponibilizada online e com um formato diferente de apresentação dos dados, como referido. As seguintes figuras (Fig. 15 a Figura 19) - foram retiradas das bases de dados de cada uma dessas empresas.

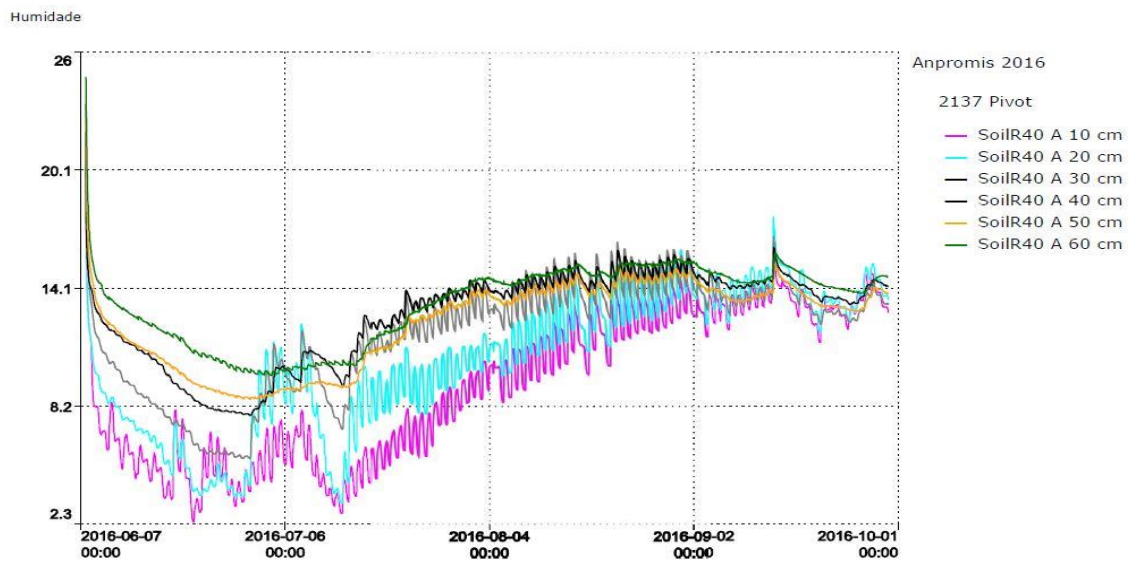


Figura 16 - Teor de água no solo, nos diferentes níveis de profundidade, da empresa 1

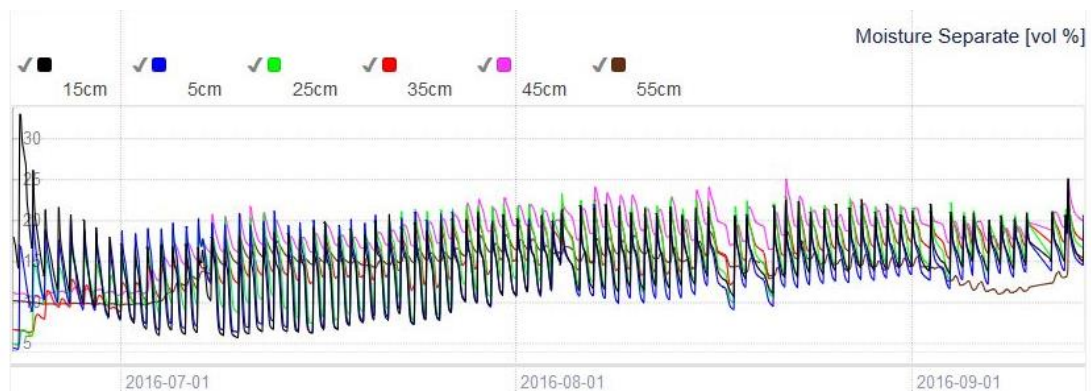


Figura 17 - Teor de água no solo, nos diferentes níveis de profundidade, da empresa 2

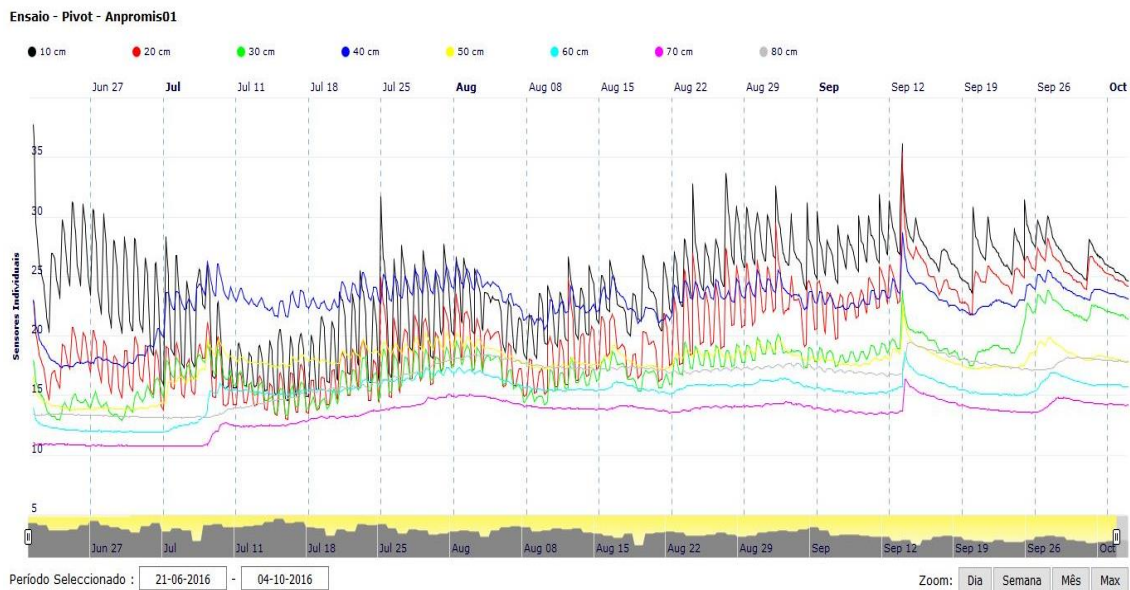


Figura 18 - Teor de água no solo, nos diferentes níveis de profundidade, da empresa 3

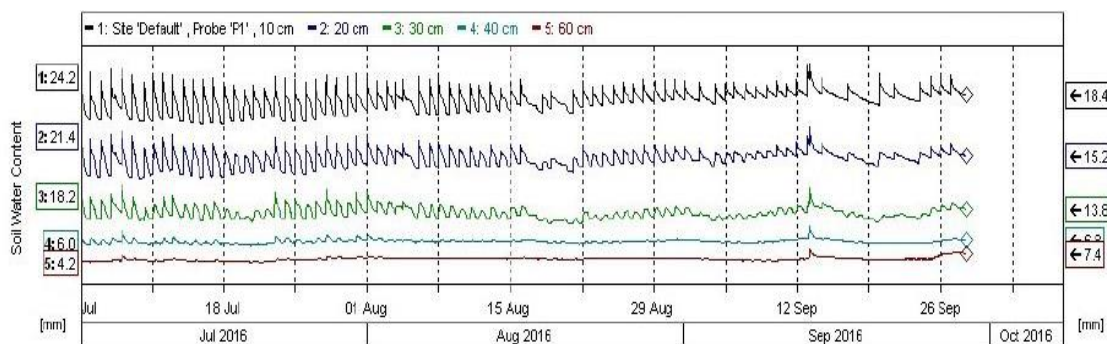


Figura 19 - Teor de água no solo, nos diferentes níveis de profundidade, da empresa 4

Observam-se oscilações que variam bastante consoante as calibrações, abordagens e formas de apresentação dos resultados, para cada empresa. É possível observar que do dia 12 de setembro existe um pico em cada gráfico, fato consistente com a ocorrência de precipitação nesse dia. Comparando os valores presentes nas figuras anteriores com o teor de humidade em volume calculado, é possível observar que a empresa 1 é a que mais se aproxima do valor calculado (dados não apresentados).

Consequentemente, as curvas apresentadas nas figuras anteriores, têm com principal objetivo perceber como se comporta a água no solo em termos de dinâmica, se existem variações sistemáticas idênticas que nos indicam se a planta está a consumir toda a água que lhe é fornecida, ou se existem perdas por percolação ou a que profundidade as raízes se encontram a extrair água.

Uma vez que não foi possível a obtenção dos dados por parte das empresas, apenas podemos analisar a variação de água no solo através das figuras anteriores (Figura 16 a Figura 19). Assim, podemos afirmar que a planta está a consumir a água que é aplicada na rega, pois em todos os sensores até à profundidade dos 40 cm existem variações de teor de água no solo que evidenciam tal facto.

A partir dos sensores dos 50 cm e 60 cm, pelo menos num dos casos - Figura 18 – os resultados sugerem que não existem raízes a extrair água ou que são em quantidade mínima pois a variação do teor de água no solo é praticamente inexistente;

Ainda assim, salientamos de novo, que o intervalo de valores do teor de água no solo varia entre as empresas devendo-se, provavelmente, ao facto de a calibração não ter sido aplicada utilizando o mesmo princípio, ou mesmo porque se usa uma escala de difícil tradução (Figura 19). Optou-se por não se adaptar os gráficos apresentados pelas empresas para que a informação apresentada no presente documento fosse correspondente à real.

4.6 Balanço hídrico do solo: sondas capacitivas

As curvas das figuras seguintes (Figura 20 a Figura 23) exibem a variação dos valores de água total no solo, desde a data de instalação da sonda até à data de desinstalação.

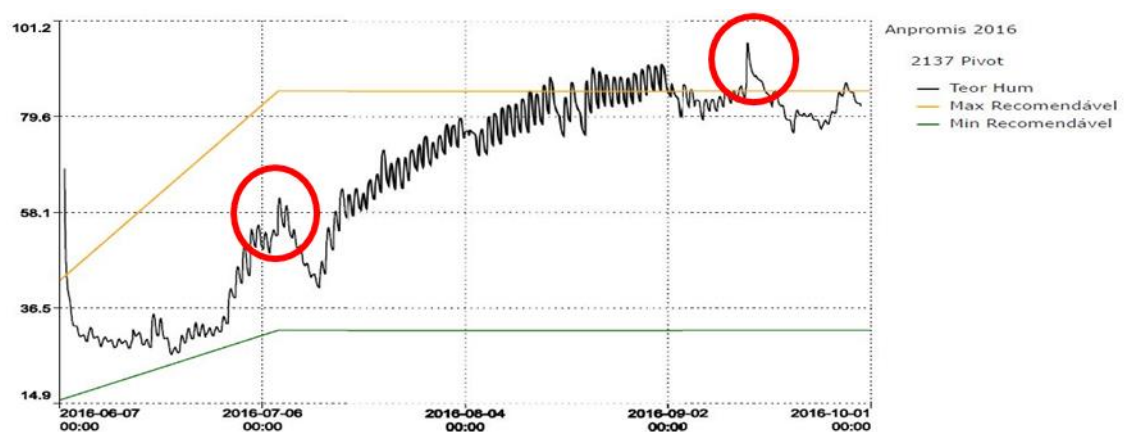


Figura 20 – Armazenamento de água no solo resultante do balanço hídrico fornecido pela empresa 1

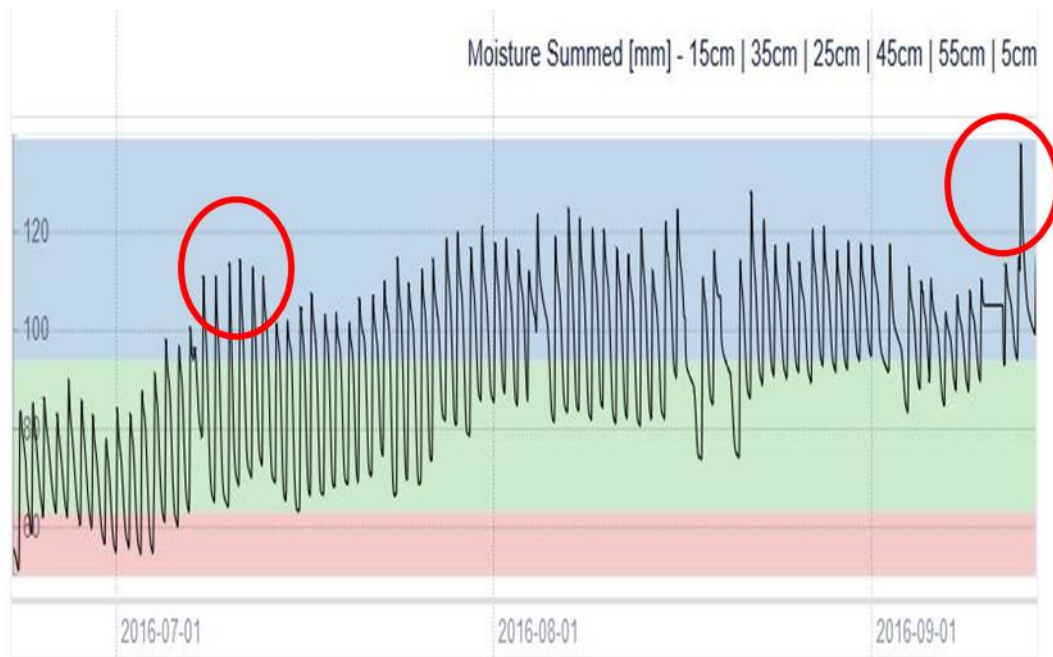


Figura 21 - Armazenamento de água no solo resultante do balanço hídrico fornecido pela empresa 2



Figura 22- Armazenamento de água no solo resultante do balanço hídrico fornecido pela empresa 3

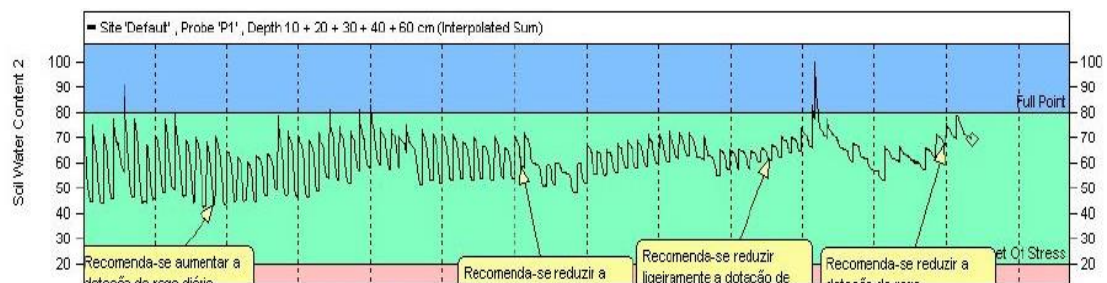


Figura 23 - Armazenamento de água no solo resultante do balanço hídrico fornecido pela empresa 4

Através da respetiva análise (Figura 20 a Figura 23), é possível perceber que o andamento dos gráficos apresentados ao longo do ciclo é semelhante. Embora a escala temporal e os limites de teor de água à CC e CE sejam ligeiramente diferentes. É possível observar alguns pontos que tornam fácil a percepção de que sondas estão a funcionar de forma idêntica, assinalados a vermelho, embora os valores absolutos estejam desfasados.

4.7 Balanço hídrico do solo: modelo

4.7.1 Teor de água no solo observado

A Figura 24 exhibe o curso do teor de água do solo (m^3/m^3), resultante da aplicação da equação do balanço hídrico (10) e (11), e os níveis de θ_{cc} e θ_{ce} bem como o limite inferior de *RFU*.

Para as condições do local em estudo, e para efeitos de modelação, o valor da fração de reserva utilizável (*p*) foi ajustado a 0,7 em relação aos valores da Tabela 22 do boletim 56 da FAO (Allen et al. 1998), pelo seguimento das circunstâncias deste estudo.

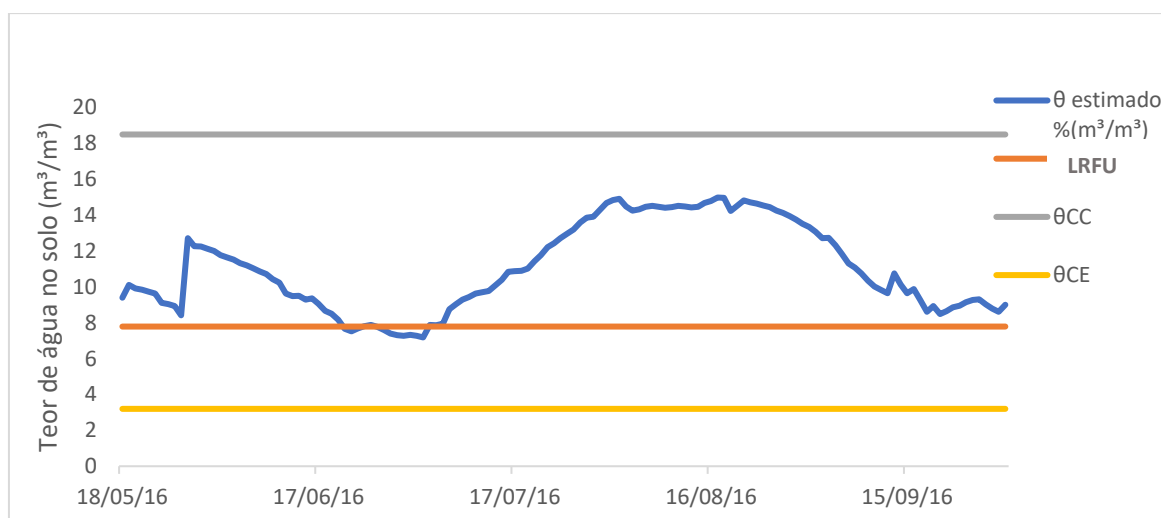


Figura 24 - Teor de água no solo estimado a partir do balanço hídrico (em relação ao limite inferior de água facilmente disponível)

Através da variação do teor de água no solo, verificou-se que a cultura não esteve, em geral, sujeita a situações de stress hídrico, uma vez que o valor é superior ao limite inferior da água facilmente disponível, à exceção do final do mês de junho.

Para verificar a validade dos parâmetros usados no modelo, comparam-se os resultados com as medições executadas pela aplicação do método gravimétrico para obter o teor de água no solo, traduzidas posteriormente em água total armazenada (Figura 25).

Cada ponto a verde representa a média de todas as amostras retiradas nas seis profundidades consideradas. Uma vez que os dados do Quadro 2, bem como a profundidade atingida pelas sondas é de 60 cm e uma vez que a sonda utilizada neste estudo tem 50 cm, extrapolaram-se os valores obtidos.

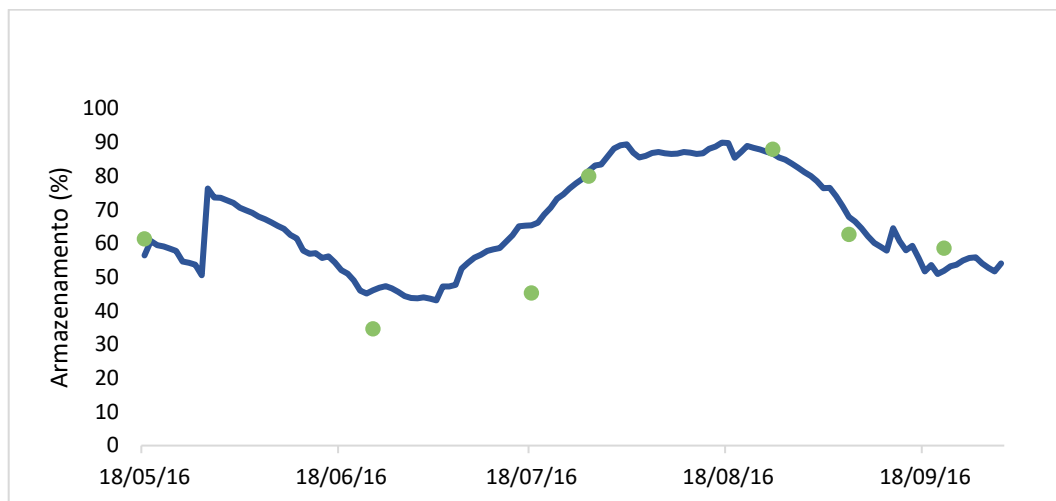


Figura 25 - Comparação entre o armazenamento simulado pelo balanço hídrico e calculado com base nas medições gravimétricas do solo (média de 6 profundidades de cada ponto) em percentagem de água total armazenada

Das sete observações realizadas pelo método gravimétrico, verificou-se que apenas três dias apresentam um desfasamento apreciável em comparação com as resultantes da estimativa, sendo a adequação bastante aceitável, sobretudo o valor de K_c usado.

No decorrer do ciclo, um dos objetivos é fazer com que exista sempre água disponível para o consumo das plantas. Daí a necessidade de saber quais as quantidades consumidas e as dotações aplicadas. Para o balanço hídrico (Figura 25), estimou-se ET_c total de 897 mm. No entanto, a quantidade de água aplicada e acrescida da precipitação ocorrida foi de 854,4 mm de água, ou seja, terá sido justo admitir que não houve percolação profunda apreciável e as plantas ainda usaram a reserva de água do solo, como aliás se observa na figura, em que o valor inicial é cerca de 15 mm superior ao final. Por outro lado, durante um período superior a duas semanas, houve um ligeiro stress hídrico pelo que o consumo real terá sido inferior a ET_c . No entanto, nesse período precisamente observa-se algum desfasamento entre os valores medidos e estimados no sentido que leva a crer ter havido subestimativa de ET_a . Consequentemente, poderíamos inferir que não terá havido stress hídrico, isto é, que o limite inferior de RFU seria mais baixo do que o usado. Tal pode estar relacionado com o um valor de p superior ao usado (ou a limites de CC e de CE menos bem ajustados, o que será menos provável).

5 Conclusão

O objetivo da dissertação foi comparar o modelo do balanço hídrico utilizando a estimativa de ET_o pela equação de Penman-Monteith e K_c , com as medições realizadas através do método gravimétrico. Os valores obtidos das sondas instaladas no local de estudo foram comparados com os métodos anteriores, de forma geral e qualitativa.

A análise dos dados obtidos ao longo do ciclo da cultura mostra que os resultados da modelação se adequaram razoavelmente bem aos resultados resultantes das medições gravimétricas.

O efeito de stress hídrico não foi considerado neste estudo uma vez que, na cultura de milho, o objetivo é que este permaneça em conforto hídrico. Ainda assim, por um curto período de tempo no final de junho, a humidade do solo esteve ligeiramente abaixo do limite inferior de RFU .

Podemos questionar a adequação dos valores estimados até ao final de junho sobre K_c , que poderia ter sido subestimado, explicando a falta temporária de adequação deste modelo simples. No entanto, como exibido na Figura 14, os valores de K_c durante este período estiveram geralmente ao seu mais alto nível, devido a K_{cb} máximo e K_e (regas diárias). Não há nenhuma razão aparente para acreditar que foram subestimados, a menos que o máximo tenha sido subestimado. No entanto, essa hipótese teria induzido uma subestimação durante as semanas seguintes, que não foi observada. Concluindo, pensa-se que este pequeno desacordo entre valores observados e modelados não é significativo.

Além disso, os *outputs* dos sensores capacitivos fornecidos pelas diferentes empresas eram difíceis de comparar com os dados obtidos pelo modelo e pelas medições através do método gravimétrico. Algumas inconsistências poderão ser devidas a: inadequada calibração das sondas; nº de pontos de medição insuficiente, logo não representativo da parcela.

De salientar que as recomendações sobre as dotações de rega não variam drasticamente. A análise dos dados não é de leitura clara devido à escala de valores apresentados, em todas as empresas. A obtenção de dados, por vezes, é limitada pela política destes serviços a respeito da confidencialidade dos dados recolhidos pelas sondas. Estes são exemplos demonstrativos das dificuldades visualizadas com sensores limitados e baixa amostragem. No entanto, podemos concluir que, perante os dados apresentados, a empresa 1 é aquela cuja apreciação qualitativa melhor se ajusta aos valores observados neste estudo.

6 Bibliografia

- Abedinpour, M. (2015). Evaluation of Growth-Specific Crop Coefficients of Maize Using Weighing Lysimeter. *Soil and Water Research* 10, 99-104.
- Abendroth, L. J. (2014). Corn Growth and Development: Climate Matters. pp. 6-7.
- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D. e Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements*. Rome: FAO (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56) p. 300.
- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D. e Wright, J.L. (2005). *Dual Crop Coef Cient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions*. FAO (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 131) pp.2-13.
- Barros, J. e Calado, J. (2014). A Cultura do Milho. 1-52.
- Bastos, E. (1987). *Guia para o Cultivo do Milho*. Coleção Brasil Agrícola.
- Berenga, J., Gavil, P. e Márquez, F. (2001). Precisión de Las Estimaciones de la ETo en un Ambiente Advectivo.
- Cameira, M. R. (1999). *Balanço de Água e Azoto em Milho Regado no Vale do Sorraia: Discussão dos Processos de Transferência e Aplicação do Modelo*. Tese de Doutorado, Instituto Superior de Agronomia, Dep. Engenharia Rural.
- Doorenbos, J. e Pruitt, W.O. (1977). *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*. FAO. Irrigation and Drainage Paper 24. p. 144.
- Evelt, S. R., e Steiner, J. L. (1995). Precision of Neutron Scattering and Capacitance Type Soil Water Content Gauges from Field Calibration. *Soil Science Society of America Journal* 59, 961.
- Evelt, S. R., Tolk, J. e Howell, T. (2006). Soil Profile Water Content Determination. *Vadose Zone Journal* 5, 894.
- Facchia A., Gharsallaha O., Corbarib C., Masseronia D., Mancinib M. e Gandolfia C. (2013). Determination of Maize Crop Coefficients in Humid Climate Regime Using the Eddy Covariance Technique. *Agrucultural Water Management* 130, 131-141.
- Fereres, E. e Sorian, M. A. (2007). Deficit Irrigation for Reducing Agricultural Water Use. *Journal of Experimental Botany* 58, 147-159.

- Ferreira Gama, M. I. (1987). *Evapotranspiração Real - Estudo Realizado na Cultura do Tomate em Região de Clima Mediterrânico*. Lisboa: Dissertação de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia.
- Ferreira, M. (2017). Stress Coefficients for Soil Water Balance Combined with Water Stress Indicators for Irrigation Scheduling of Woody Crops. *horticultirae*.
- Ferreira, M. I. (1996). Evapotranspiração e Stress Hídrico em Cobertos Arbóreo-Arbustivos numa Perspectiva de Gestão da Água em Região Mediterrânica. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, 45, 343-385.
- Hua, Y. Z. (2016). Design of Soil Moisture Distribution Sensor Based on High-Frequency Capacitance. *Int J Agric & Biol Eng* 9.
- Instituto Nacional de Estatística. (2016). *Previsões Agrícolas 31 de Outubro 2016 Primavera Chuvosa e Verão Muito Quente Afetam Campanha Agrícola*. INE.
- Kjelgaard, J. F. and Stockle C. O. (2001). *Evaluating Surface Resistance for Estimating Corn and Potato Evapotranspiration with The Penman–Monteith Model*. Sr. Joseph, Mitch.: ASABE.
- Kutílek, M. e Nielsen, D. R. (1994). *Soil Hydrology*. GeoEcology Textbook.
- Livingston, N. J. and Clarke Topp, G. (2006). *Chapter 71 Soil Water Potential*. Agriculture, no.1965.
- Melo e Melo, P. (1986). *El Maiz*. Cultivos de Regadio, I, pp. 176-249.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and Environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*.
- Mwale, S. S., Azam-Ali, S. N. and Sparkes, D. L. (2005). Can the PR1 Capacitance Probe Replace the Neutron Probe for Routine Soil-Water Measurement? *Soil Use and Management* 21, 340-347.
- Nelson, C. J and Larson, K. L. . (1984). Seeding Growth . *Physiological Basis of Crop Growth and Development*, 93–129. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America.
- Oliveira, I. (2011). *Técnicas de Regadio - Teoria e Prática*. Edição do Autor, 2º.
- Penman, H. L. (1948). Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 193 (1032), 120-145.

- Perez, P. J., S. Lecina, F. Castellvi, A. Martínez-Cob e F. J. Villalobos. (2006). A Simple Parameterization of Bulk Canopy Resistance from Climatic Variables for Estimating Hourly Evapotranspiration. *Hydrology Processes* 20, 515-532.
- Raposo Rasquilho, J. (1994). *A Rega por Aspersão*. Clássica E.
- Raposo Rasquilho, J. (1996). *A Rega*. Fundação C.
- Ritchie, J. T. (1972). Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover. *Water Resources Research* 8, 1204-1213.
- Rolland, L. (1982). Mechanized Sprinkler Irrigation. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 35, 409.
- Shahidian, S. (2013). Gestão Da Água No Regadio. Em *Hidrologia Agrícola* (pp. 225-243).
- Steduto, P., C. H., Theodore, Fereres, E. and Raes, D. (2012). Crop Yield Response to Water. *FAO Irrigation and Drainage Paper*.
- Stoskopf, N. (1985). Corn. Em *Cereal Grain Crops* (pp. 351-368).
- Tollenaar, M., e Dwyer, L. M. (1999). Physiology of Maize. Em *Crop Yield: Physiology and Processes* (pp. 169-204). Berlin: Donald L Smith and Chantal Hamel.
- Ventura, F. Facini, O. Piana, S. e Pisa, P. R. (2010). Soil Moisture Measurements: A Comparison of Instrumentation Performances. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136, 81-89.